

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

## NÁVRH STABILIZOVANÉHO NAPÁJECÍHO ZDROJE SPÍ- NANÉ KONCEPCE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

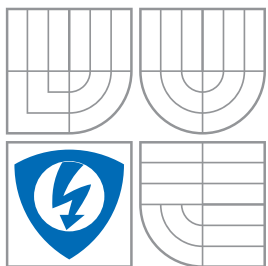
AUTHOR

Bc. LENKA ZELINKOVÁ

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING  
AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

## NÁVRH STABILIZOVANÉHO NAPÁJECÍHO ZDROJE SPÍ- NANÉ KONCEPCE

DESIGN OF SWITCHING-MODE REGULATED POWER SUPPLY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. LENKA ZELINKOVÁ

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. LUBOMÍR BRANČÍK, CSc.

BRNO 2011



**VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií**

**Ústav radioelektroniky**

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
**Elektronika a sdělovací technika**

**Studentka:** Bc. Lenka Zelinková

**ID:** 78363

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2010/2011

## NÁZEV TÉMATU:

**Návrh stabilizovaného napájecího zdroje spínané koncepce**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Proveďte rešerši dostupné literatury z oblasti stabilizovaných napájecích zdrojů. Zaměřte se na zdroje pracující na spínaném principu. Porovnejte koncepce možných obvodových řešení z hlediska jejich vhodnosti pro realizaci zdroje s parametry 0 až  $\pm 25\text{V}/15\text{A}$ .

Proveďte ideový návrh spínaného napájecího zdroje s rozsahem výstupního napětí 0 až  $\pm 25\text{V}$  a zatížitelností 15A, opatřeného elektronickou pojistkou a digitálními ukazateli nastavených výstupních veličin. Proveďte simulaci funkce navrženého zapojení v simulátoru PSpice a navrhnete desku plošných spojů pomocí programu Eagle.

Na základě předchozího ideového návrhu realizujte spínaný napájecí zdroj předepsaných parametrů, včetně návrhu a realizace vhodného transformátoru. Zapojení oživte a proveďte měření jeho parametrů. Výsledky měření srovnajte s parametry očekávanými v rámci návrhu i získanými počítačovou simulací.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] KREJČÍŘÍK, A. Spínané napájecí zdroje s obvody TOPSwitch. Praha: BEN, 2002.

[2] FAKTOR, Z. Transformátory a tlumivky pro spínané napájecí zdroje. Praha: BEN - technická literatura, 2002.

**Termín zadání:** 7.2.2011

**Termín odevzdání:** 20.5.2011

**Vedoucí práce:** prof. Ing. Lubomír Brančík, CSc.

**prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida**  
Předseda oborové rady

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá ideovým návrhem a realizací spínaného zdroje s nastavitelným výstupním napětím do 25V a zatížitelností maximálně 15A. Zdroj je navržen v zapojení polovičního můstku. Vlastnosti zapojení jsou simulovány v programech PSpice a Micro-Cap. V práci jsou zahrnuty výsledky simulací, konstrukční podklady a výsledky měření na realizovaném funkčním vzorku.

## Abstract

The thesis addresses the conceptual design and implementation of the switched-mode power supply having the adjustable dc voltage output up to 25V and current output up to 15A. The half-bridge topology is used for this supply. Design features and quantities are simulated in PSpice and Micro-Cap simulation tools. The thesis covers the simulation results, assembly data and the results measured on the implemented functional sample.

## Klíčová slova

Pulzní měnič, spínaný zdroj, poloviční můstek, pulzní transformátor, proudový transformátor

## Keywords

Pulse converter, switching power, half bridge, pulse transformer, current transformer

## Citace

Lenka Zelinková: Návrh stabilizovaného napájecího zdroje spínané koncepce, diplomová práce, Brno, FEKT VUT v Brně, 2011

# Návrh stabilizovaného napájecího zdroje spínané koncepce

## Prohlášení

Jako autor diplomové práce na téma „Návrh stabilizovaného napájecího zdroje spínané koncepce“ dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědoma následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

.....  
Lenka Zelinková  
18. května 2011

© Lenka Zelinková, 2011.

*Tato práce vznikla jako školní dílo na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií. Práce je chráněna autorským zákonem a její užití bez udělení oprávnění autorem je nezákonné, s výjimkou zákonem definovaných případů.*

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Spínané zdroje</b>	<b>6</b>
2.1	Porovnání lineárních a spínaných zdrojů . . . . .	6
2.2	Dělení spínaných zdrojů . . . . .	6
2.3	Měniče napětí . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Blokové schéma</b>	<b>12</b>
<b>4</b>	<b>Transformátory a tlumivky</b>	<b>14</b>
4.1	Základní vlastnosti . . . . .	14
4.2	Konstrukce . . . . .	16
<b>5</b>	<b>Řízení zdroje</b>	<b>18</b>
<b>6</b>	<b>Návrh zdroje 25V/15A</b>	<b>21</b>
6.1	Sít'ová část, pulzní měnič . . . . .	21
6.2	Výstupní usměrňovač, regulační obvody . . . . .	22
6.3	Transformátor a výstupní tlumivka . . . . .	22
<b>7</b>	<b>Simulace</b>	<b>26</b>
<b>8</b>	<b>Návrh a osazení DPS</b>	<b>30</b>
8.1	Výkonový transformátor . . . . .	30
8.2	Sít'ová část . . . . .	31
8.3	Výstupní část . . . . .	32
<b>9</b>	<b>Konstrukce zdroje</b>	<b>34</b>
<b>10</b>	<b>Oživení zdroje</b>	<b>35</b>
10.1	Deska 1 . . . . .	35
10.2	Deska 2 . . . . .	38
10.3	Celkové oživení zdroje . . . . .	40
<b>11</b>	<b>Závěr</b>	<b>47</b>
<b>12</b>	<b>Seznam zkratek a symbolů</b>	<b>48</b>
	<b>Literatura</b>	<b>49</b>

<b>Přílohy</b>	<b>51</b>
Seznam příloh . . . . .	52
<b>A Simulace</b>	<b>53</b>
<b>B Schéma zapojení</b>	<b>56</b>
<b>C Desky plošných spojů</b>	<b>62</b>
<b>D Osazení DPS</b>	<b>66</b>
<b>E Návrh skříně</b>	<b>68</b>
<b>F Rozpisky součástek</b>	<b>71</b>



# Seznam obrázků

2.1	Zapojení blokujícího měniče . . . . .	8
2.2	Zapojení propustného měniče . . . . .	9
2.3	Zapojení snižujícího měniče . . . . .	9
2.4	Zapojení zvyšujícího (Boost) měniče . . . . .	10
2.5	Zapojení invertujícího měniče . . . . .	10
2.6	Zapojení úplného můstku . . . . .	11
2.7	Zapojení polovičního můstku . . . . .	11
2.8	Zapojení dvojčinného měniče se středním vývodem na primárním vinutí .	11
3.1	Blokové schéma spínaného zdroje . . . . .	12
5.1	Typické zapojení zdroje s použitím obvodu LM5008 . . . . .	18
5.2	Vnitřní zapojení obvodu TL494 . . . . .	19
5.3	Průběhy napětí v obvodu TL494 . . . . .	19
5.4	Zapojení zdroje s použitím obvodů řady TOPSwitch-HX . . . . .	20
6.1	Vlastnosti zvoleného jádra transformátoru . . . . .	23
7.1	Zjednodušené zapojení navrhovaného zdroje s diodovým usměrňovačem . .	26
7.2	Výstupní napětí a proud při maximální střídě spínání tranzistorů . . . . .	27
7.3	Výstupní napětí a proud při 50% střídě spínání tranzistorů . . . . .	28
7.4	Zjednodušené zapojení navrhovaného zdroje s tranzistorovým usměrňovačem	28
7.5	Výstupní napětí a proud při maximální střídě spínání tranzistorů . . . . .	29
8.1	Použité jádro transformátoru U64 a pohled na sekundární vinutí . . . . .	31
8.2	Sestavený výkonový pulzní transformátor . . . . .	31
8.3	Osazená deska sít'ových obvodů . . . . .	32
8.4	Osazená deska výstupních obvodů . . . . .	33
9.1	Pohled na skříň zdroje . . . . .	34
10.1	Pilový průběh v bodě <i>X35</i> ( <i>IO12</i> , pin5) . . . . .	36
10.2	Minimální šířka pulzů . . . . .	37
10.3	Maximální šířka pulzů . . . . .	37
10.4	Střední šířka pulzů . . . . .	37
10.5	Detail min. mezery pulzů . . . . .	37
10.6	Minimální šířka pulzů na výstupu LO obvodu <i>IO14</i> . . . . .	38
10.7	Maximální šířka pulzů na výstupu LO obvodu <i>IO14</i> . . . . .	38
10.8	Střední šířka pulzů na výstupu LO obvodu <i>IO14</i> . . . . .	39
10.9	Minimální šířka pulzů na výstupech HO a VS obvodu <i>IO14</i> . . . . .	39

10.10	Maximální šířka pulzů na výstupech HO a VS obvodu <i>IO14</i> . . . . .	39
10.11	Střední šířka pulzů na výstupech HO a VS obvodu <i>IO14</i> . . . . .	39
10.12	Provizorní montážní rám s deskami pro ožiování . . . . .	40
10.13	Průběh napětí v bodech <i>X32</i> , <i>X33</i> , úzké pulzy . . . . .	41
10.14	Průběh napětí v bodech <i>X32</i> , <i>X33</i> , široké pulzy . . . . .	41
10.15	Průběh napětí v bodech <i>X32</i> , <i>X33</i> , střední šířka pulzů . . . . .	41
10.16	Sít'ová deska, rezistor <i>R34</i> (výstup proud. transformátoru) . . . . .	42
10.17	Výstupní deska, vstup <i>L61</i> , nastaveny úzké pulzy . . . . .	42
10.18	Výstupní deska, vstup <i>L61</i> , nastaveny širší pulzy . . . . .	42
10.19	Zvlnění výstupního napětí, složka 100Hz . . . . .	44
10.20	Zvlnění výstupního napětí, složka kmitočtu PWM . . . . .	44
10.21	Pohled na přední část displeje . . . . .	45
10.22	Pohled na desku displeje . . . . .	45
A.1	Schéma simulovaného zjednodušeného obvodu . . . . .	53
A.2	Výsledky simulace 1. část - pulzní obvody . . . . .	54
A.3	Výsledky simulace 2. část - obvody regulační smyčky . . . . .	55
B.1	Původní návrh zapojení sít'ové části a pulzního měniče . . . . .	57
B.2	Realizované schéma zapojení sít'ové části a pulzního měniče . . . . .	58
B.3	Původní návrh zapojení výstupního usměrňovače a regulačních obvodů . . . . .	59
B.4	Realizované schéma zapojení výstupního usměrňovače a regulačních obvodů . . . . .	60
B.5	Výkres propojení desek . . . . .	61
C.1	DPS sít'ové části a pulzního měniče, strana TOP . . . . .	62
C.2	DPS sít'ové části a pulzního měniče, strana BOTTOM . . . . .	63
C.3	DPS výstupního usměrňovače a regulačních obvodů, strana TOP . . . . .	64
C.4	DPS výstupního usměrňovače a regulačních obvodů, strana BOTTOM . . . . .	65
D.1	Osazovací výkres sít'ové části a pulzního měniče . . . . .	66
D.2	Osazovací výkres výstupního usměrňovače a regulačních obvodů . . . . .	67
E.1	Návrh rozmístění ovládacích a indikačních prvků na předním panelu zdroje . . . . .	68
E.2	Návrh rozmístění prvků napájení na zadním panelu zdroje . . . . .	68
E.3	Výkres pro vrtání otvorů v čele skříně zdroje . . . . .	69
E.4	Výkres pro vrtání otvorů v zadní části skříně zdroje . . . . .	69
E.5	Výkres pro vrtání otvorů v bočních stěnách skříně zdroje . . . . .	70

# Kapitola 1

## Úvod

Mým úkolem bylo během tří semestrů navrhnout a zrealizovat spínaný zdroj s regulovatelným napětím maximálně do 25V a zatížitelností do 15A.

V prvním semestru jsem se seznámila s literaturou týkající se spínaných zdrojů, vlastnostmi a konstrukcí tlumivek a transformátorů pro tyto zdroje a s principy funkce a vlastnostmi integrovaných obvodů sloužících k řízení výstupních veličin.

Vzhledem k požadovanému výkonu zdroje jsem se zaměřila na dvojčinná zapojení propustných měničů. Tyto měniče mohou být řízeny pomocí pulzní šířkové modulace, kterou lze s výhodou generovat integrovanými obvody.

Ve druhém semestru jsem navrhla a pomocí programu PSpice ověřila simulací funkci zdroje zadaných parametrů. Vzhledem k požadovanému výkonu jsem zvolila měnič napětí v zapojení polovičního můstku. Pro řízení zdroje pomocí PWM a buzení koncového stupně jsem využila specializované obvody TL494 a IR2110. Desky plošných spojů jsem navrhla v programu Eagle.

V posledním, třetím semestru, jsem zdroj podle návrhu zrealizovala. Záznamy z měření jsou uvedeny v kapitole 10.

## Kapitola 2

# Spínané zdroje

### 2.1 Porovnání lineárních a spínaných zdrojů

Hlavními nevýhodami lineárních síťových zdrojů jsou objem, hmotnost a cena, které s požadovaným výkonem značně narůstají. Velikost a hmotnost zdroje je dána především síťovým transformátorem. Spínané zdroje proto pracují ve většině případů s podstatně vyšším než síťovým kmitočtem, což umožňuje radikální zmenšení rozměrů transformátoru. Další výhodou spínaných zdrojů je vysoká účinnost. Lineární zdroje dosahují účinnosti 55%, spínané zdroje až nad 90%. Proto spínané zdroje dosahují při nižším objemu, hmotnosti a ceně vyšších výkonů.

Výhodou spínaných zdrojů je také možnost jejich napájení z kolísavícího vstupního napětí a možnost zlepšení účinníku až na hodnotu blížíící se 1.

Nevýhodou spínaných zdrojů jsou pomalejší reakce s možností výskytu zákmitů při rychlých změnách zatěžovacího proudu. Při požadavku na malé zvlnění výstupního napětí musí být zohledněn impulzní charakter zdroje, což klade zvýšené nároky na výstupní obvody z hlediska filtrace vysokofrekvenčních složek. Při nevhodném návrhu může být spínaný zdroj také zdrojem rušení způsobeného obvodem se spínacími prvky. Tento typ rušení se může projevit v audiotechnice jako pískání popř. jako parazitní modulace u vysokofrekvenčních přístrojů.

Další nevýhodou může být možnost přesné regulace jen jednoho výstupního napětí. Při nutnosti generování několika výstupních napětí z jednoho zdroje je možnost regulaci jednotlivých výstupů váhově rozdělit s vhodně zvoleným poměrem. Určitému vzájemnému ovlivňování těchto výstupů při značně kolísavících zátěžích nelze ale ani tímto způsobem zabránit. Více např. v [2], nebo v [7].

### 2.2 Dělení spínaných zdrojů

Podle zapojení výstupních obvodů, kterými jsou spínací prvky, transformátory, filtrační a vazební kondenzátory a tlumivky, rozdělujeme spínané zdroje na rezonanční, nerezonanční a kvazirezananční.

Rezananční spínané zdroje jsou vhodné pro menší výkony a pro vysokonapět'ové zdroje. Pomocí rezonance se snižují ztráty způsobené spínáním spínacích prvků na vyšších kmitočtech a omezují se problémy s rušením (EMC). Využívá se rezonance kapacity a indukčnosti, přičemž se rezonanční obvod ke zdroji energie připíná v nule napětí nebo v nule proudu (Royerovo zapojení). Na principu regulace zdroje kmitočtem na pravé straně re-

zonanční křivky (v oblasti induktivního charakteru) pracují obvody s dvěma rezonančními obvody typu LLC nebo LCC [13].

Nerezonanční zdroje dosahují výkonů až do desítek kilowattů. Na rozdíl od rezonančních zdrojů mají stálý kmitočet spínání.

Podle kmitočtu se spínané zdroje dělí na zdroje:

- s kmitočtem sítě
  - bez transformátoru
  - s transformátorem
    - \* s pulzní regulací v primární části
    - \* s pulzní regulací v sekundární části
- s kmitočtem vyšším než sít'ovým
  - s jednočinným blokujícím měničem
    - \* měnič s jedním spínačem
    - \* měnič se dvěma spínači
  - s jednočinným propustným měničem
    - \* měnič s jedním spínačem
    - \* měnič se dvěma spínači
  - s dvojčinným měničem
    - \* protitaktní
    - \* dvojčinný se čtyřmi spínači
    - \* dvojčinný s kapacitními děliči

## 2.3 Měniče napětí

Měniče mohou být zapojeny jako blokující nebo propustné, dále jako snižující (step-down, Buck), zvyšující (step-up, Boost) nebo invertující (Buck-Boost) měniče. V případě blokujících a propustných měničů s galvanickým oddělením je v obvodu zapojen impulzní transformátor.

Na vstup měniče je přivedeno stejnosměrné (usměrněné a filtrované) napětí. Protože vyšší kmitočet umožňuje pro daný výkon snížit rozměry transformátoru, je napětí spínáním tranzistoru (spínače  $S$ ) převedeno na obdélníkový průběh s pracovním kmitočtem nad slyšitelným pásmem (od 20kHz až do jednotek MHz). Na vyšších kmitočtech se ale začínou negativně projevovat dynamické vlastnosti zejména výkonových polovodičů (jejich spínací a rozpínací doby), vliv parazitních kapacit těchto prvků a horší filtrační vlastnosti kondenzátorů, zejména elektrolytických.

Připojením vstupních napájecích obvodů ke vstupu měniče a výstupního usměrňovače a filtru zvlnění napětí tak můžeme realizovat stejnosměrný napájecí zdroj. Více viz [2], [19] a [20].

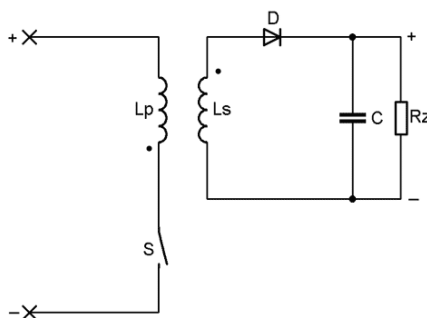
Pro výkony 60W až 100W bývá zdroj obvykle zapojen jako jednočinný blokující měnič, pro vyšší výkony jako dvojčinný propustný měnič.

## Blokující měnič

Blokující měnič s impulzním transformátorem se používá při požadavku větších výstupních napětí a menších výstupních proudů. Veškerá přenášená energie je akumulována v jádře transformátoru, proto pro větší výkony vychází transformátor rozměrnější. Výhodou může být odolnost tohoto typu zdroje proti zkratu na výstupu.

Při sepnutém spínači  $S$  se indukuje v magnetickém obvodu transformátoru magnetické pole. Sekundárním vinutím v tomto okamžiku neprochází proud, protože dioda  $D$  je uzavřená. Rozpojením spínače zaniká magnetické pole a smysl indukce a tím i polarita napětí na sekundárním vinutí se otáčí. Dioda  $D$  se otevře a uzavře obvod do zátěže (obrázek 2.1).

Výhodou těchto měničů je i jejich jednoduchost.



Obrázek 2.1: Zapojení blokujícího měniče (převzato z [2])

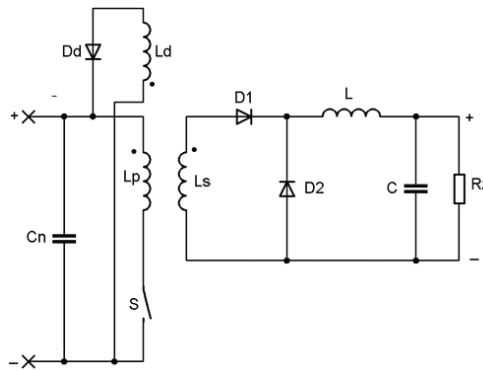
## Propustný měnič

Pro vyšší výkony a zatěžovací proudy je vhodnější propustný měnič.

Vinutí  $Ld$  na obrázku 2.2 je tzv. demagnetizační vinutí. Má stejný počet závitů jako primární vinutí  $Lp$ , je ale vinuto v opačném smyslu.

Při sepnutém spínači je přenášena energie z primárního na sekundární vinutí transformátoru. Při rozepnutí spínače se indukuje proud v demagnetizačním vinutí. Ten se uzavírá přes diodu  $Dd$  zpět na vstup zdroje. Vinutí  $Ld$  tak zabraňuje stejnosměrnému přesycení transformátoru (obrázek 2.2).

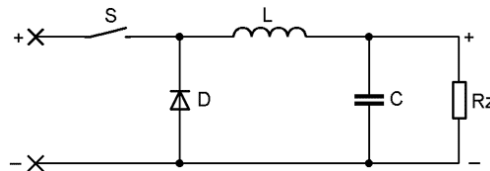
Zapojení má lepší odezvu výstupního napětí na změnu doby zapnutí a vypnutí spínacího prvku. Výhodou je také vyšší účinnost.



Obrázek 2.2: Zapojení propustného měniče (převzato z [2])

### Snižující měnič

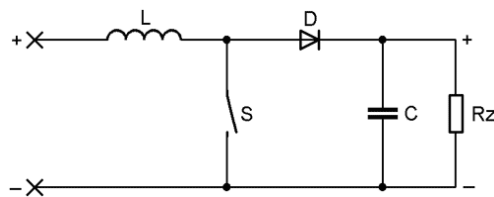
V případě snižujícího měniče bez galvanického oddělení (Buck) je spínáním spínače  $S$  regulována doba nabíjení kondenzátoru  $C$ . Při sepnutém spínači se vytváří magnetické pole v tlumivce  $L$  a proudem v obvodu se nabíjí kondenzátor  $C$ . Při rozepnutí spínače se vlivem zanikání magnetického pole napětí na tlumivce přepóluje, rekuperační dioda paralelně ke vstupu se otevře, tlumivka do výstupního kondenzátoru dodává proud ve stejném směru a kondenzátor se opět nabíjí na požadovanou polaritu. Při určitém proudu do zátěže a tzv. kritické indukčnosti tlumivky dochází ke stavu, kdy proud tekoucí tlumivkou neklesá až k nule - není přerušován. Pro nižší proudy do zátěže již k přerušování proudu dochází, protože se v tlumivce během sepnutí spínače nenaakumuluje dostatečné množství energie pro pokrytí proudu do zátěže po celou dobu rozepnutí spínače  $S$  (obrázek 2.3).



Obrázek 2.3: Zapojení snižujícího měniče (převzato z [2])

### Zvyšující měnič

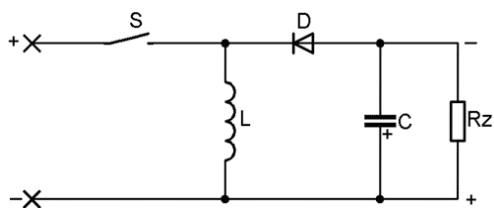
Sepnutím spínače  $S$  se akumuluje energie v magnetickém obvodu indukčnosti  $L$ . Při rozepnutí spínače se napětí na indukčnosti přepóluje a tím se přičte k napájecímu napětí. Na výstupu tak získáme vyšší napětí než na vstupu měniče (obvod je na obrázku 2.4).



Obrázek 2.4: Zapojení zvyšujícího (Boost) měniče (převzato z [2])

### Invertující měnič

Sepnutím spínače  $S$  vzniká v indukčnosti  $L$  vlivem průchodu proudu magnetické pole. Po rozepnutí spínače  $S$  magnetické pole začne zanikat a indukčnost v opačném směru dodává proud, který přes diodu  $D$  nabíjí kondenzátor  $C$ , viz obr. 2.5.



Obrázek 2.5: Zapojení invertujícího měniče (převzato z [2])

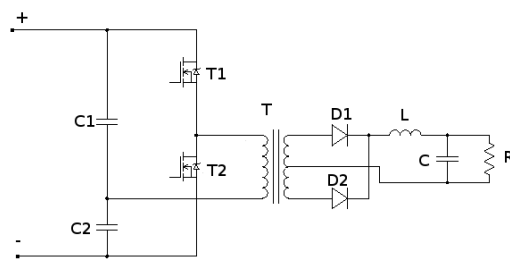
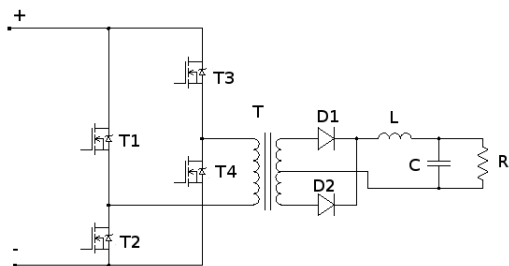
### Dvojčinný úplný můstek

Dvojčinný měnič s úplným můstkem, viz obr. 2.6, je vhodný pro vysoké výstupní výkony. Vzhledem ke čtyřem spínacím tranzistorům jsou potřeba poměrně složité řídicí obvody. Při nesymetrii spínačů může dojít k jejich nežádoucímu současnému otvírání v jedné větvi nebo stejnosměrnému sycení transformátoru. Tento obvod není vhodný pro vysoké frekvence spínání (problémy nastávají při kmitočtech nad 0.5MHz). Pro zlepšení přechodových jevů při spínání (spínání při nulovém napětí) a zlepšení účinnosti se v poslední době u tohoto typu zapojení používá spínání s fázovým posuvem (Phase-Shifted Full-Bridge Converter) [13].

### Dvojčinný poloviční můstek

Na obrázku 2.7 je dvojčinný měnič zapojený jako poloviční můstek (Half bridge). Výhodou tohoto zapojení je možnost použití více vinutí na transformátoru a tím realizace více výstupů. Špičky napětí, které vznikají na rozptylové indukčnosti, jsou odváděny od zdroje. V tomto zapojení je vyloučené stejnosměrné předmagnetování jádra transformátoru a je možné použít poměrně vysokého kmitočtu spínání. Naopak nevýhodou ve srovnání s úplným můstkem je vyšší zvlnění na výstupu a poloviční výkon při stejném napájecím napětí.

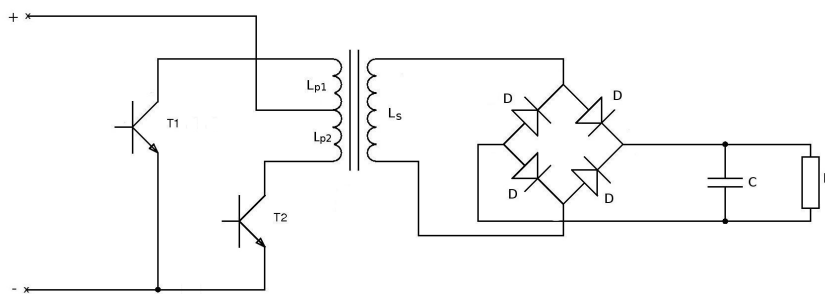




Obrázek 2.6: Zapojení úplného můstku Obrázek 2.7: Zapojení polovičního můstku

### Dvojčinný měnič se středním vývodem na primárním vinutí transformátoru

Nevýhodou dvojčinného měniče se středním vývodem na primárním vinutí transformátoru (Push-Pull) je složitější návrh a konstrukce transformátoru s odbočkou na primární straně. Rovněž napět'ové namáhání spínacích prvků dvojnásobně překračuje napájecí napětí. Toto zapojení ale dobře napájecí napětí využívá, takže lze i při malých napájecích napětích dosáhnout velkých výkonů, viz. obrázek 2.8.

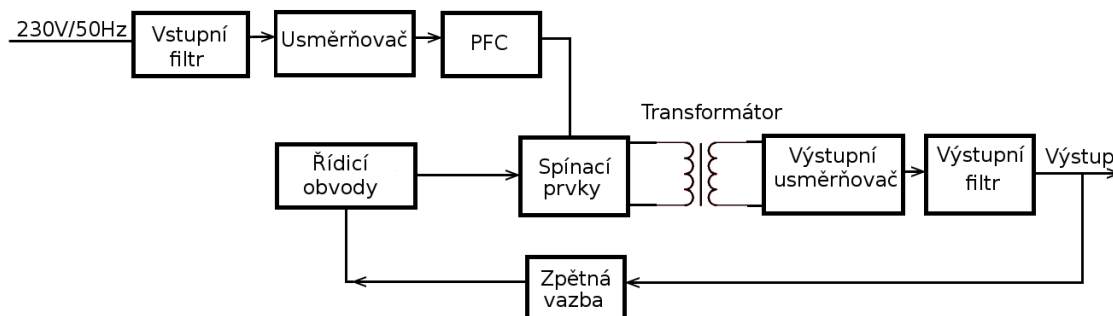


Obrázek 2.8: Zapojení dvojčinného měniče se středním vývodem na primárním vinutí

## Kapitola 3

# Blokové schéma

Na obrázku 3.1 je blokové schéma zapojení spínaného zdroje. Vstupní napětí je přivedeno na filtr, který slouží k odrušení mezi zdrojem a sítí. Poté je napětí usměrněno. Následně je spínáním a rozpínáním výkonového prvku přeměněno na určitou, většinou vyšší než sít'ovou frekvenci a přivedeno na transformátor. Po odebrání z výstupu sekundárního vinutí je již usměrněno a po průchodu filtrem typu dolní propust je přivedeno na výstupní svorky. Z výstupu je odebrán vzorek napětí do zpětné vazby k regulaci výstupu pomocí pulzní šířkové modulace na spínaném výkonovém prvku.



Obrázek 3.1: Blokové schéma spínaného zdroje

### Vstupní filtr

Za vstupní svorky zdroje je připojen širokopásmový filtr, který chrání průběh sít'ového napětí před zkreslením rušivými signály ze zdroje. Filtr propouští užitečný signál o kmitočtu 50Hz, rušivé signály, které mají vyšší kmitočet, utlumí. Obvykle bývá realizován jako LC filtr typu dolní propust, s tlumivkou v podélné větvi a kondenzátory ve větvi příčné. Při volbě součástek je nutné vybírat součástky s malými parazitními parametry, mezi které patří činný odpor přívodů, svodový odpor a indukčnost přívodů a elektrod. Rovněž je třeba uvážit dimenzování na požadovaný proud u indukčností a na střídavé napětí u kondenzátorů (bezpečnostní třídy X a Y). Více lze nalézt v [10].

## Usměrňovač

Vstupní usměrňovač je většinou zapojen do tzv. Graetzova můstku. Usměrněný signál je za ním přiveden na kapacitní filtr.

## Korekce účinníku

Vzhledem k výkonu zdroje je uvažováno o zařazení obvodu PFC (power factor correction, korekce účinníku). Vzhledem k tomu, že proud je z napájení zdroje odebírán pouze v krátkých pulzech v okamžicích otvírání usměrňovacích diod, dochází k deformaci vstupního napětí (generují se vyšší harmonické složky a přidávají se k signálu). Tato deformace se se zvyšujícím výkonem zařízení zvyšuje, protože proudové impulzy odebírané ze sítě mají vyšší hodnotu. Obvod PFC snižuje proudovou špičku a rozšiřuje impuls, kdy zdroj odebírá energii. Tím omezuje rušivé vyzařování ze zdroje do sítě a chrání napájecí napětí před nadměrným zkreslením. Povolené zkreslení průběhu napájecího napětí je uvedeno v normách pro EMC. Více, viz [14].

Jako jednoduchého obvodu PFC lze využít tlumivky za usměrňovacím můstkem, která značně přispívá k vyhlazení proudových impulzů a tím i k potlačení vyšších harmonických složek proudu. Tento způsob sice není tak účinný a neumožňuje využít široký rozsah napájecích napětí jako je tomu u aktivního zapojení PFC, ve zdrojích do několika stovek W ale často vyhoví. Začal se využívat i u moderních výkonných zdrojů, určených pro PC.

## Spínací prvky

Spínací prvky a transformátor jsou zapojeny jako měnič napětí. Spínacím prvkem je obvykle tranzistor. Pro spínané zdroje se dnes často využívají tranzistory typu MOSFET nebo IGBT.

Bipolární tranzistory s izolovaným hradlem (Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT) jsou kombinací unipolárního a bipolárního tranzistoru. Spojují v sobě jejich výhody, protože na vstupu mají vysoký vstupní odpor a na výstupu je možné je výkonově zatížit. Také parazitní kapacity, které hrají významnou roli při spínacích procesech, bývají podstatně menší. Jsou výhodné pro vyšší napětí a velké proudy. Pro menší napětí a velké proudy lze dosáhnout menších úbytků napětí v sepnutém stavu s moderními tranzistory typu MOSFET. Více např. v [18].

Vlastnosti transformátoru jsou popsány v kapitole 4.

## Výstupní obvody

Po průchodu transformátorem je napětí usměrněno. Usměrňovač může být řízený nebo neřízený. Dále pak může být zapojen jako jednocestný, příp. dvoucestný s odbočkou na transformátoru nebo v zapojení tzv. Graetzova můstku. Za usměrňovačem je napětí přivedeno na výstupní filtr. Ten bývá realizován tlumivkou a kondenzátorem.

## Zpětná vazba a řídicí obvody

Výstupní napětí je snímáno a zpětnou vazbou přivedeno na řídicí obvody, které pomocí pulzní šířkové modulace řídí spínání tranzistoru a tím úroveň výstupního napětí. Řídicím obvodem mohou být např. integrované obvody. Podrobněji bude řízení spínacího prvku popsáno v kapitole 5.

## Kapitola 4

# Transformátory a tlumivky

### 4.1 Základní vlastnosti

Transformátor přenáší pomocí magnetické indukce napětí z primárního vinutí na vinutí sekundární. V případě ustáleného stavu činnosti pulzního zdroje magnetická indukce  $B$  přechází z jedné hodnoty periodicky do druhé. Magnetická indukce  $B$  budí v jádře s průřezem  $S_e$  magnetický tok  $\phi$

$$\phi = B \cdot S_e. \quad (4.1)$$

Pro periodu spínání  $T$ , indukce v jádru po dobu  $\delta T$  roste a po dobu  $(1-\delta)T$  klesá.  $\delta$  je činitel plnění napět'ových impulzů, které vyvolávají v jádru magnetickou indukci. V době trvání impulzu je napětí  $U_2$  na sekundární straně vinutí

$$U_2 = \frac{U_1}{n}, \quad (4.2)$$

kde  $U_1$  je napětí na primárním vinutí a  $n$  je napět'ový transformační poměr.

Konstanta úměrnosti mezi magnetickým cívkovým indukčním tokem  $\phi$  a magnetovacím proudem  $I_m$  je indukčnost  $L$

$$L = \frac{\Delta\phi_c}{\Delta I_m}. \quad (4.3)$$

Pokud na vinutí cívky s magnetickým jádrem přivedeme pravoúhlý napět'ový impulz, indukční tok v závislosti na čase lineárně vzrůstá. Lineárně poroste i magnetovací proud do hodnoty

$$I_{mMAX} = \frac{\int_0^{\delta T} u \cdot d \cdot t}{L} = \frac{U \cdot \delta \cdot T}{L}. \quad (4.4)$$

Při skokové změně napětí na cívce se magnetovací proud skokově nemění, ale ve stejné polaritě klesá nebo roste. Pokud klesá magnetický indukční tok, klesá i magnetovací proud a na cívce se detekuje záporné napětí. Pokud magnetický indukční tok roste, napětí je kladné. Více v [7].

Při návrhu transformátoru nejprve určíme indukčnost primárního vinutí transformátoru  $L_0$ . Pomocí ní určíme velikost proudu  $i$  odpovídající jedné periodě v obdélníkovém průběhu. Vycházíme ze vztahu

$$u \cdot \delta T = L \cdot \Delta i. \quad (4.5)$$

Indukční konstantu jádra zjistíme buď měřením na zvoleném jádře, nebo přibližně výpočtem

$$Al = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{S_{ef}}{l_e}. \quad (4.6)$$

Pro další výpočet zvolíme maximální magnetickou indukci  $B_{max}$ . Počet závitů určíme ze vztahu

$$L \cdot I = N \cdot B \cdot S \quad (4.7)$$

Výše popsané výpočty je třeba přizpůsobit zvolenému jádru. Pro přípustnou maximální indukci  $B$  můžeme mít menší průřez jádra a více závitů  $N$ , pak ale hrozí, že pro nutnou proudovou hustotu se nám vinutí nevejde do okénka transformátoru a zvýší se ztráty ve vinutí. Při větším průřezu jádra vyjde počet závitů pro daný proud a indukčnost vinutí menší. Pro dostavení potřebné indukčnosti  $L$  a při problémech se stejnosměrným sycením jádra si lze pomoci vzduchovou mezerou mezi oběma částmi jádra. Může to ale vést ke snížení činitele vazby a ke zvýšení rozptylové indukčnosti transformátoru. Zvětšováním vzduchové mezery roste celkový magnetický odpor jádra, v důsledku toho konstanta jádra  $AL$  a tím i indukčnost vinutí klesá.

Podle transformačního poměru  $n$  se poté určí na sekundární straně vinutí počet závitů  $N_2$  a indukčnost  $L_2$ .

Na závěr zkontrolujeme jestli návrh odpovídá parametrům zvoleného jádra.

### Ztráty v jádře transformátoru

Ztráty v jádře transformátoru se určí pomocí vzorce

$$P_v = P_{ld} \cdot V_e \cdot 10^{-3}. \quad (4.8)$$

Hodnota tlumivky se určí pomocí vzorce

$$L_0 = \frac{\frac{U_{1min}}{n} - U_0 \cdot 1.04}{\Delta I_L} \cdot \delta_{max} \cdot T \quad (4.9)$$

a podle vzorce

$$L_0 = \frac{\frac{U_{1max}}{n} - U_0 \cdot 1.04}{\Delta I_L} \cdot \delta_{min} \cdot T. \quad (4.10)$$

Volí se větší vypočtená hodnota.

## Proudový transformátor

Pro ideální proudový transformátor vycházíme z předpokladu, že pracuje do zkratu, tj.  $u_2=0$ , potom i  $u_1=0$  a sycení jádra  $B=0$ . Pro transformaci proudu platí

$$i_2 = n \cdot i_1. \quad (4.11)$$

Reálný proudový transformátor je zatížen nenulovou zátěží a vykazuje rozptylovou indukčnost a ztráty. Proto pak už neplatí, že  $u_2=0$  a  $u_1=0$  a platí, že  $B>0$ . U měřicího proudového transformátoru volíme  $n$  co nejmenší (např. 1:50) a úbytek napětí na zátěži sekundárního vinutí rovněž co nejmenší. Pak celkové ztráty i při měření velkých střídavých proudů mohou být při použití proudového transformátoru proti jiným metodám bezkonkurenčně malé, protože i při malých rozměrech transformátoru a jádra pro nízkofrekvenční aplikace s vysokým  $\mu_r$  může být sycení  $B$  velmi malé. Touto metodou nelze měřit stejnosměrnou složku proudu, ale je nutné na ni brát ohled z hlediska sycení jádra. Proto mohou vzniknout problémy s přesycením jádra, pokud neplatí, že stejnosměrná složka  $I$  je mnohem menší než stř. složka  $I$ . V našem případě je měřený obvod oddělen kondenzátorem a měřený proud stejnosměrnou složku nevykazuje. S výhodou lze použít toroidní feritové jádro s vysokým  $\mu_r$  a proto i malým rozptylem, primární vinutí tvoří pouze 1 průchod vodiče toroidem (=1 závit), sekundární vinutí má např. 50z Cu vodičem o průměru 0.3mm.

## 4.2 Konstrukce

### Transformátory

Transformátor pracuje na pracovním kmitočtu (obvykle vyšším než síťovém). S ohledem na povrchový jev se tomuto kmitočtu musí přizpůsobit průměr použitých vodičů. Ten by měl být nanejvýš trojnásobný než je hloubka vniku. Vinutí jsou často jednovrstvá, což zvyšuje nároky na izolaci vodičů, protože jeden závit může být navržen i na několik voltů. Více například v [7].

Vinutí transformátoru je vrstevné (závit vedle závitu), protože tak má nejvyšší činitel plnění vinutí. Pokud potřebujeme nízkou vlastní kapacitu vinutí nebo vyšší elektrickou pevnost, navineme jako první vysokoimpedanční vinutí, které mívá slabší vodič. Zvýší se tím i mechanická ochrana slabšího vodiče. Obecně ale platí zásada, že první je navíjeno nízkoimpedanční vinutí. Toto uspořádání má výhodnější rozložení odporů a lépe odvádí teplo z vinutí s větším počtem závitů. Závity jsou navinuty na jádře, které může být železoprachové, feritové nebo složené z feromagnetických plechů s krystalickou strukturou.

Po přivedení napájecího napětí vykazuje transformátor vlivem náběhu magnetizace a vybitých kondenzátorů na výstupu usměrňovače zdroje malou impedanci, proto je vhodné zařadit do série s napájeným zdrojem rezistor, který se po zvýšení impedance transformátoru odpojí. Ten může být realizován i součástí se záporným teplotním koeficientem odporu (typu NTC - při zvýšení teploty sníží odpor).

### Tlumivky

Konstrukčně se tlumivky od transformátorů příliš neliší. Rozdílem je, že mají nanejvýš dvě vinutí. Také na ně není kladen tak velký důraz na elektrickou pevnost mezi vinutími, protože bezpečnostní oddělení od vstupního napětí je realizováno hlavní izolací transformátoru.

Tlumivka bývá navinuta do tvaru válce nebo toroidu (prstence). Lineární charakteristiku mají tlumivky bez jádra nebo se jí mohou blížit tlumivky s jádrem a větší vzduchovou mezerou. Pokud má tlumivka uzavřené jádro, její charakteristika může být značně nelineární.

Jádra se používají železoprachová nebo feritová z amorfních magnetických materiálů.

## Kapitola 5

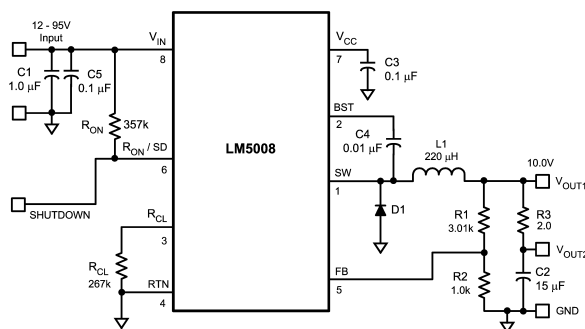
# Řízení zdroje

Výstupní napětí je regulováno pulzní šířkovou modulací (PWM). Její frekvence udává frekvenci napětí na transformátoru, střída signálu reguluje velikost výstupního napětí. PWM generátor je možné realizovat pomocí specializovaných integrovaných obvodů a v poslední době i pomocí jednočipových mikroprocesorů nebo programovatelných polí. Ty kromě generátoru pulzní modulační obsahují obvykle i další funkce. Pro nižší vstupní napětí a výstupní výkony je možné zapojit spínaný zdroj pomocí integrovaného obvodu v přímé větvi obvodu. V tomto zapojení nebývá zapojený transformátor. Zpětná vazba z výstupu je vedena zpět do integrovaného obvodu, jehož součástí je komparátor, který porovnává pilový průběh s velikostí napětí odpovídajícímu výstupní veličině (napětí, proud), tím řídí střidu modulační a reguluje výstupní napětí.

Nevýhodou integrovaných obvodů může být nutnost použití více velikostí napájecích napětí (napájení jádra, napájení vstupů/výstupů, atd.). Další nevýhodou je zapojení integrovaných obvodů ve zpětné vazbě, kde nejsou galvanicky odděleny od vstupního napětí. V případě nutnosti galvanického oddělení je možné použít ve zpětné vazbě oddělovací optočlen nebo transformátor.

### Obvody National semiconductor

Příklad snižujícího měniče LM5008 firmy National semiconductor je na obrázku 5.1. Vstupní napětí obvodu je v rozmezí 9.5V a 95V, výstupní napětí 2.5V až 75V. Maximální výstupní proud obvodu je 350mA. Frekvence spínání je nastavitelná v rozmezí 50kHz až 600kHz.

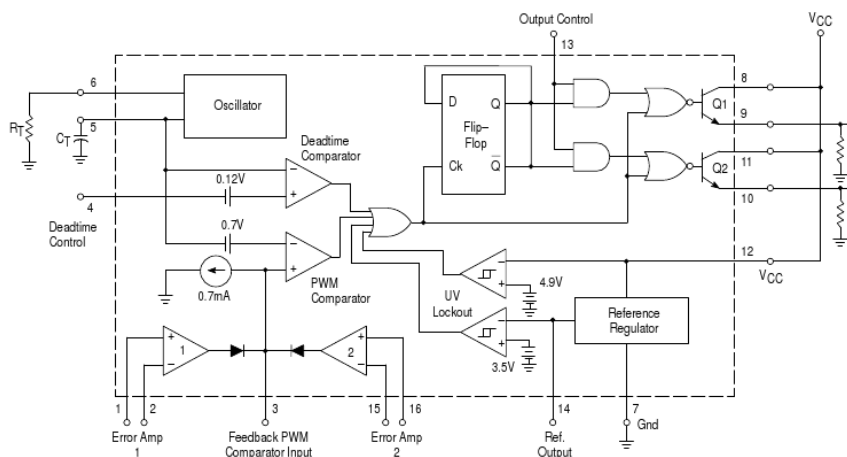


Obrázek 5.1: Typické zapojení zdroje s použitím obvodu LM5008 (převzato z [12])

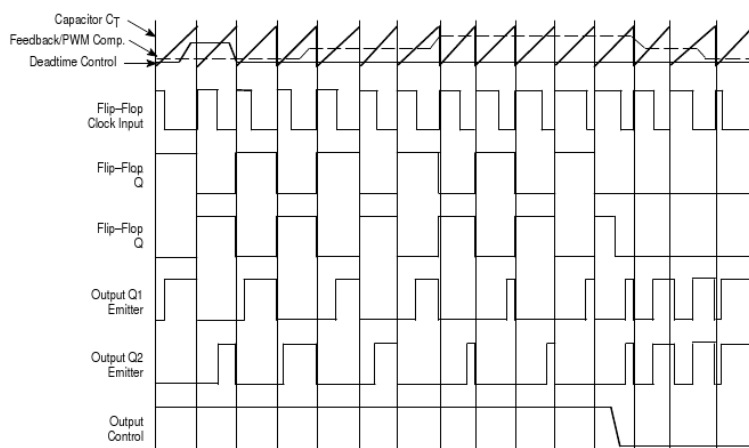


## Obvod TL494

Známý obvod dnes již vyrábí několik firem. Tento obvod poskytuje dva výstupy obdélníkového průběhu napětí a umožňuje konstrukci několika typů měničů. Tento obvod je vhodný k řízení jednoduchých i můstkových zapojení. Díky konstrukci obvodu je zajištěn i ochranný interval kdy jsou oba výstupní signály na nule, takže nemůže dojít k překrytí výstupních impulsů. Technická data obvodu jsou uvedena např. na [www stránce \[15\]](#).



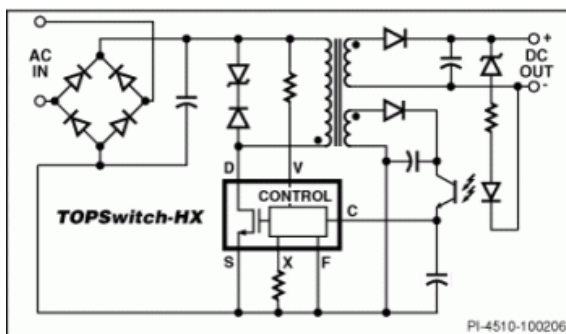
Obrázek 5.2: Vnitřní zapojení obvodu TL494  
(převzato z [15])



Obrázek 5.3: Průběhy napětí v obvodu TL494  
(převzato z [15])

## Obvody Top Switch

Firma Power Integrations nabízí v současné době obvody řady TOPSwitch-HX, přizpůsobené pro zapojení do zpětné vazby zdroje. Příklad zapojení zdroje je na obrázku 5.4. Tyto obvody obsahují například integrovaný výkonový MOSFET tranzistor, oscilátor, PWM modulátor, teplotní pojistku a obvod pro kontrolu výstupního napětí.



Obrázek 5.4: Zapojení zdroje s použitím obvodů řady TOPSwitch-HX (převzato z [17])

Další informace jsou k dispozici na stránkách výrobce, viz [17].

## Kapitola 6

# Návrh zdroje 25V/15A

Návrh zapojení je uveden v příloze B.1. Schéma je rozděleno na dvě části. První schéma obsahuje síťovou část zdroje a pulzní měnič, druhé schéma obsahuje výstupní usměrňovač a regulační obvody pro kladnou polaritu výstupního napětí.

### 6.1 Síťová část, pulzní měnič

Za síťovým přívodem následuje jištění tavnou pojistkou a filtrace nesouhlasného rušení bezpečnostními kondenzátory třídy X2 ( $C3$ ) a X1/Y1 ( $C1$ ,  $C2$ ). Pro potlačení souhlasného rušení je zařazena tlumivka  $L1$  (CM filter). Pro potlačení proudového nárazu do vybitých kapacit po zapnutí je zařazen termistor  $R1$ . Síťové napětí je usměrněno Graetzovým můstkem z diod  $D1$ - $D4$ , který je doplněn odrušovacími kondenzátory  $C4$ ,  $C5$  a  $C6$ . Za usměrňovač lze zařadit některý typ obvodu PFC. Pro ověření parametrů zdroje uvažují o řešení s tlumivkou. Následuje filtrace pomocí  $C7$ ,  $C8$ ,  $C9$  a  $C10$ .

Pro generování PWM je použit integrovaný obvod TL494 označený jako  $IO12$ . Pracovní frekvenci určuje RC člen  $R22$  a  $C18$  podle vztahu uváděného výrobcem [15]:

$$f_{osc} = \frac{1.1}{R \cdot C}. \quad (6.1)$$

První zesilovač odchylky v  $IO12$  je zařazen ve smyčce zpětné vazby. Rezistory  $R13$  a  $R14$  nastavují jeho stejnosměrné zesílení,  $R15$  a  $C17$  jsou určeny pro kmitočtovou kompenzaci zesilovače.

Druhý zesilovač v  $IO12$  je využit pro nadproudovou ochranu. Porovnává mez, nastavenou děličem  $R18$  a  $R19$  s napětím, odvozeným z hodnoty proudu, který protéká jednak koncovým stupněm  $T1$ ,  $T2$  a je snímán na rezistoru  $R28$  jednak z hodnoty proudu tekoucím do pulzního transformátoru a snímaného měřicím proudovým transformátorem  $TR2$  s usměrňovačem. Výstupní dvoufázové PWM impulzy jsou z  $IO12$  přivedeny na vstupy  $IO14$ . Jde o specializovaný obvod pro buzení polovičních můstků až do napětí 500V. Potřebné budicí napětí pro horní tranzistor  $T1$  si je schopen tento obvod vyrábět sám pomocí zapojení typu bootstrap s použitím externí diody  $D12$  a kondenzátoru  $C22$  (viz. obvod IR2110 [9]). Elektrody G výstupních tranzistorů  $T1$  a  $T2$  jsou chráněny proti přepětí pomocí ZD  $D15$  a  $D16$ , omezení proudových špiček zajišťují rezistory  $R26$  a  $R27$ , rychlé odvedení náboje zlepšují diody  $D13$  a  $D14$ . Proudové špičky, které mohou vznikat při přepínání tranzistorů, potlačuje tlumivka  $L2$  zatlumená rezistorem  $R5$ . Výstupní transformátor

je oddělen kondenzátory  $C25$ ,  $C26$  a  $C27$ , alternativně lze uvažovat o jejich nahrazení propojkou a připojení výstupu transformátoru do středu filtračních kondenzátorů  $C7$ ,  $C8$ ,  $C9$  a  $C10$  do bodu  $X3$ .

Pro napájení elektroniky na potenciálu sítě je určen pomocný lineární zdroj malého výkonu ( $Tr1$ ,  $D6$ - $D9$ ,  $IO1$ ).

## 6.2 Výstupní usměrňovač, regulační obvody

Sekundární vinutí s odbočkou napájí dvoucestný usměrňovač se 2 diodami. Alternativně je uvažována i možnost použít k usměrňování zapojení s tranzistory MOSFET nebo IGBT (podle obvodu UCC28089 firmy Texas Instruments, viz. [16]). Za usměrňovačem je zařazena filtrační tlumivka  $L61$  a filtrační kondenzátory  $C71$ - $C78$ . Z důvodu jejich proudového namáhání je zapojeno více kondenzátorů paralelně. Z výstupu zdroje se odebírá napětí přes  $R70$  a  $R72$  pro měření napětí a z  $R75$  přes  $R73$  a  $R74$  napětí pro měření odebíraného proudu. Měřenou veličinu na měřidle lze volit přepínačem připojeným k bodům  $X66$ ,  $X69$  a  $X71$ . Po drobných úpravách lze použít i digitálních displejů s napětěvým analogovým vstupem, např. HD-3128 viz. [8].

Napětěvá zpětná vazba je tvořena diferenčním zesilovačem  $OZ61$  a zesilovačem  $OZ62$ , který porovnává vzorek výstupního napětí s regulovatelným referenčním napětím. To je přivedeno do bodu  $X78$  z potenciometru nebo digitálně řízeného převodníku typu DAC.

Výstup  $OZ62$  přes oddělovací optočlen  $IO10$  řídí přes 1. zesilovač odchylky v  $IO12$  šířku pulzů pomocí PWM a tím dorovnává výstupní napětí na požadovanou hodnotu.

Pokud se výstup  $OZ62$  dostane do saturace, znamená to, že smyčka není schopna dostavit výstupní napětí na požadovanou hodnotu - zdroj je přetížen. Tento stav zpracovává tranzistor  $T63$  a rozsvítí se LED dioda připojená k bodům  $X81$  a  $X82$ . Velikost výstupního proudu je snímána na  $R75$  potenciometrem, připojeným k bodům  $X72$ ,  $X73$  a jezdcem na  $X74$ , nastavitelná hodnota je zesílena pomocí  $OZ63$  a přes oddělovací optočlen  $IO11$  je řízen vstup DTC u generátoru PWM v  $IO12$ . Tento obvod umožňuje nastavit limitaci výstupního proudu na požadovanou hodnotu.

Rezistory ve vstupech  $OZ61$  a  $OZ63$  umožňují alternativní osazení pro kladný nebo záporný zdroj. Pro napájení  $OZ$  v regulačních obvodech slouží pomocné dvoucestné usměrňovače  $D65$ - $D68$  s filtrací ( $C63$ ,  $C64$ ,  $C68$  a  $C69$ ) a stabilizací ( $IO61$  a  $IO63$ ). Referenční napětí pro regulátor poskytuje stabilizátor  $IO62$ . Pokud by šířka pulzů při nejnižších napětích na výstupu zdroje nestačila pro spolehlivé napájení obvodů (při požadavku nastavit výstupní napětí až k nulové hodnotě), lze alternativně použít po přepnutí přepínačů  $J61$  a  $J62$  alternativní pomocné zdroje.

## 6.3 Transformátor a výstupní tlumivka

Výpočet transformátoru byl řešen pomocí skriptu v programu Octave (obdoba programu Matlab). Transformátor je navržen pro maximální odebíraný výkon. Výpočet byl proveden podle postupu popsaného v kapitole 4 a literatury [11], [3] a [7]. Pro konstrukci transformátoru bylo vybráno jádro UR644020 z materiálu 3f3. Část katalogových údajů je na obrázku 6.1, více viz. [4] a [1]. Z katalogu jsou zjištěny hodnoty  $l_e = 210\text{mm}$  a  $A_e = S_e f = 290\text{mm}^2$ . Potom

Z popisu materiálu 3f3 [1] určíme  $B_{max} = 0.35\text{T}$ . Z příslušné křivky odečteme  $H = 50\text{A/m}$ .

DESCRIPTION	SHAPE	DIMENSIONS (mm)						EFFECTIVE CORE PARAMETERS				
		A	B	C	D <sub>min</sub>	E	F	C1 (mm <sup>-1</sup> )	V <sub>e</sub> (mm <sup>3</sup> )	I <sub>e</sub> (mm)	A <sub>e</sub> (mm <sup>2</sup> )	MASS (g)
UR64/40/20	7	64.0	26.5	20.0	23.2	20.0	40.5	0.726	61 000	210	290	160

Obrázek 6.1: Vlastnosti zvoleného jádra transformátoru (převzato z [4])

$$\mu_r = \frac{B_{max}}{\mu_0 \cdot H} = \frac{0.3}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 50} = 5573. \quad (6.2)$$

Potom

$$A_L = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{S_{ef}}{l_e} = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 5573 \cdot \frac{290 \cdot 10^{-6}}{210 \cdot 10^{-3}} = 9671 nH / z^2. \quad (6.3)$$

Transformátor je spínán dvěma tranzistory. Vzhledem k tomu že nesmí být sepnuty současně, je omezena střída signálu. Uvažujeme střidu spínání každého z tranzistorů maximálně 45%.  $\delta_{max}$  je potom  $2 \times 45\% = 90\%$ .

Při výpočtu napětí odebíraného na výstupu transformátoru musíme k napětí požadovanému na výstupu zdroje přičíst také ztráty v obvodech za transformátorem. Proto

$$U_{sec} = \frac{U_{outmax} + U_d}{\delta_{max}} = \frac{25 + 1}{0.9} = 28.9V. \quad (6.4)$$

Zdroj bude napájen síťovým napětím 230V. Toleranci sítě uvažuji -15%, +10%, to znamená, že vstupní napětí se bude pohybovat v rozmezí 195.5V - 253V. Pro minimální síťové napětí je

$$U_{minprimar} = U_{vstmin} \cdot \sqrt{2} - U_D - U_{ztr} = 195.5 \cdot \sqrt{2} - 2 - 22 = 252V. \quad (6.5)$$

A pro maximální síťové napětí je

$$U_{maxprimar} = U_{vstmax} \cdot \sqrt{2} - U_D - U_{ztr} = 253 \cdot \sqrt{2} - 2 - 2 = 354V. \quad (6.6)$$

Z těchto napětí určím převod transformátoru jako

$$n = \frac{U_{minprimar}}{2 \cdot U_2} = \frac{252}{2 \cdot 28.9} = 4.4. \quad (6.7)$$

Počet závitů na primárním vinutí bude tedy

$$N_1 = \frac{U_{maxprimar} \cdot \delta_{max} \cdot T}{B_{max} \cdot S_{ef}} = \frac{354 \cdot 0.9 \cdot 20 \cdot 10^{-6}}{0.35 \cdot 290 \cdot 10^{-6}} = 63z. \quad (6.8)$$

Pro polovinu sekundárního vinutí platí

$$N_{2pol} = \frac{N_1}{n} = \frac{63}{4.4} = 15z. \quad (6.9)$$

Primární indukčnost je

$$L_1 = A_L \cdot N_1^2 = 9671 \cdot 63^2 = 38mH \quad (6.10)$$

a pomocí ní určíme

$$\Delta i = \frac{U_{maxprimar} \cdot \delta_{max} \cdot T}{L_1} = \frac{354 \cdot 0.9 \cdot 20 \cdot 10^{-3}}{38 \cdot 10^{-3}} = 0.17A. \quad (6.11)$$

Vzhledem k tomu, že na sekundární straně transformátoru budou dvě vinutí, která se budou ve své funkci střídát, je možné volit pro vodič proudovou hustotu  $\sigma_1=6A/mm^2$ . Průřez vodiče sekundáru musí být tedy minimálně

$$S_2 = \frac{I_{outmax}/\delta_{max}}{\sigma_1} = \frac{15/0.9}{6} = 2.78mm^2. \quad (6.12)$$

Průměr vodiče bude tedy

$$d_2 = \sqrt{\frac{4 \cdot S_2}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2.78 \cdot 10^{-6}}{\pi}} = 1.9mm. \quad (6.13)$$

Vzhledem k vysokým maximálním proudům je možné vinout transformátor dvěma navzájem izolovanými vodiči s polovičním průřezem nebo lankem (tzv. licnou).

Pro proud na primární straně platí pro maximální proud

$$I_1 = \frac{I_{outmax}/\delta_{max}}{n} = \frac{15/0.9}{4.4} = 3.79A, \quad (6.14)$$

průřez vodiče bude tedy

$$S_1 = \frac{I_1}{\sigma_2} = \frac{3.79}{4} = 0.95mm^2. \quad (6.15)$$

Průměr vodiče bude

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot S_1}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0.95 \cdot 10^{-6}}{\pi}} = 1.1mm. \quad (6.16)$$

Zvolený transformátor má okénko pro vinutí o rozměrech 48mm x 6mm, tzn. plocha pro vinutí je 288mm<sup>2</sup>. Při výpočtu plochy vodiče uvažujeme vodič čtvercového průřezu o velikosti hrany rovné průměru vypočteného kruhového vodiče. Pro primární vinutí je plocha primárního vinutí tedy rovna počtu závitů primárního vinutí krát  $d_1^2$ , což je rovno 76.23mm<sup>2</sup>. Pro obě sekundární vinutí platí, že plocha sekundárního vinutí je rovna počtu závitů krát  $d_2^2$ , což je 108.3mm<sup>2</sup>. Celková plocha vinutí je rovna součtu primárního a sekundárního vinutí, což je 184.53mm<sup>2</sup>. Činitel využití plnění je roven podílu plochy pro vinutí a plochy vinutí, což je  $\alpha_v = 0.64$ . Vinutí se tedy do okénka cívky zvoleného jádra transformátoru bez problémů vejde i s proklady mazi vinutími a izolacemi vodičů.

Pro výstupní tlumivku bude použito hrníčkové jádro s označením P42 x 29 z materiálu PRAMET H12 (viz [6]) s  $A_L = 400$ . Na jádru je navinuto 12 závitů vodičem o průměru  $d = 2$ mm, což odpovídá průřezu  $S = 3.14$ mm<sup>2</sup>. Z katalogu je  $A_e = S_e = 242$ mm<sup>2</sup>. Indukčnost  $L = 56\mu$ H.

Magnetická indukce je tedy

$$B = \frac{L \cdot I}{N \cdot S_e \cdot \delta_{max}} = \frac{56 \cdot 10^{-6} \cdot 15}{12 \cdot 242 \cdot 10^{-6} \cdot 0.9} = 0.32T. \quad (6.17)$$

Proudová hustota vodiče je

$$\sigma = \frac{I}{\delta_{max} \cdot S} = \frac{15}{0.9 \cdot 3.14} = 5.3A/mm^2 \quad (6.18)$$

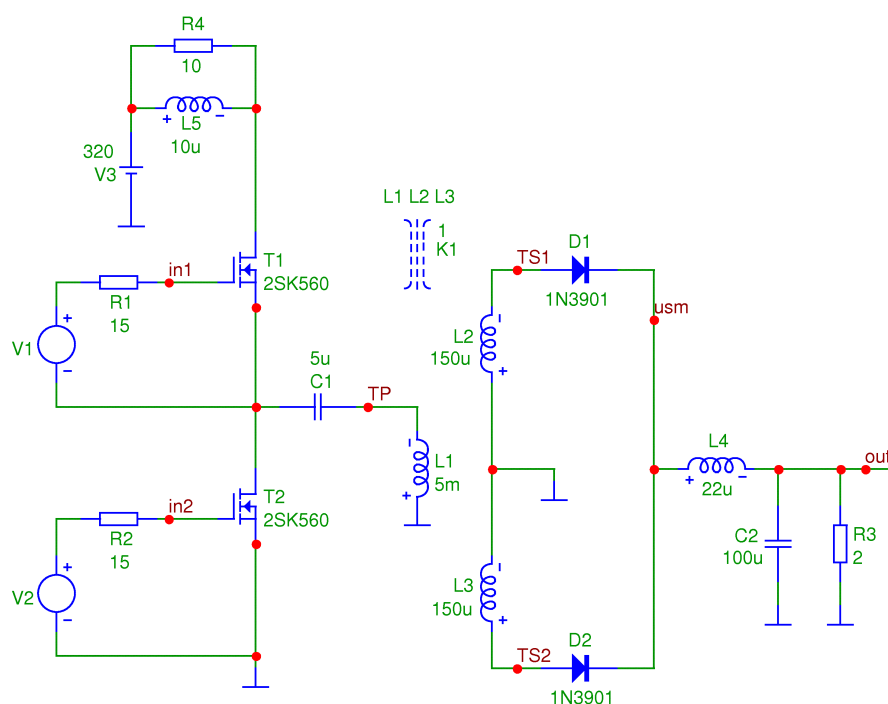
Magnetická indukce v jádru i proudová hustota ve vodiči vyhovuje pro parametry navrhovaného zdroje.

## Kapitola 7

# Simulace

Simulace obvodu proběhla ve dvou programech. V programu PSpice (Orcad 10 demo) a Micro-Cap 9. Simulováno bylo pouze zjednodušené základní zapojení pro ověření principu funkce. Hodnoty naměřené na zrealizovaném zdroji se tedy mohou poněkud lišit.

V programu Micro-Cap byl simulován obvod podle schématu na obrázku 7.1. K usměrnění výstupního napětí bylo tentokrát použito zapojení usměrňovače s diodami. Studentská verze programu neumožňuje parametrickou analýzu s víc jak jedním rozmítaným parametrem, proto byla změna střídy signálu simulována postupně.



Obrázek 7.1: Zjednodušené zapojení navrhovaného zdroje s diodovým usměrňovačem

Na obrázku 7.2 je výsledek simulace při plné střídě signálu s uvažováním bezpečnostního intervalu proti překrytí pulzů. Na výstupu je obvod zatížen hodnotou  $2\Omega$  což odpovídá téměř plnému výkonu zdroje. Výstupní napětí je tedy nepatrně vyšší než požadovaných 25V,



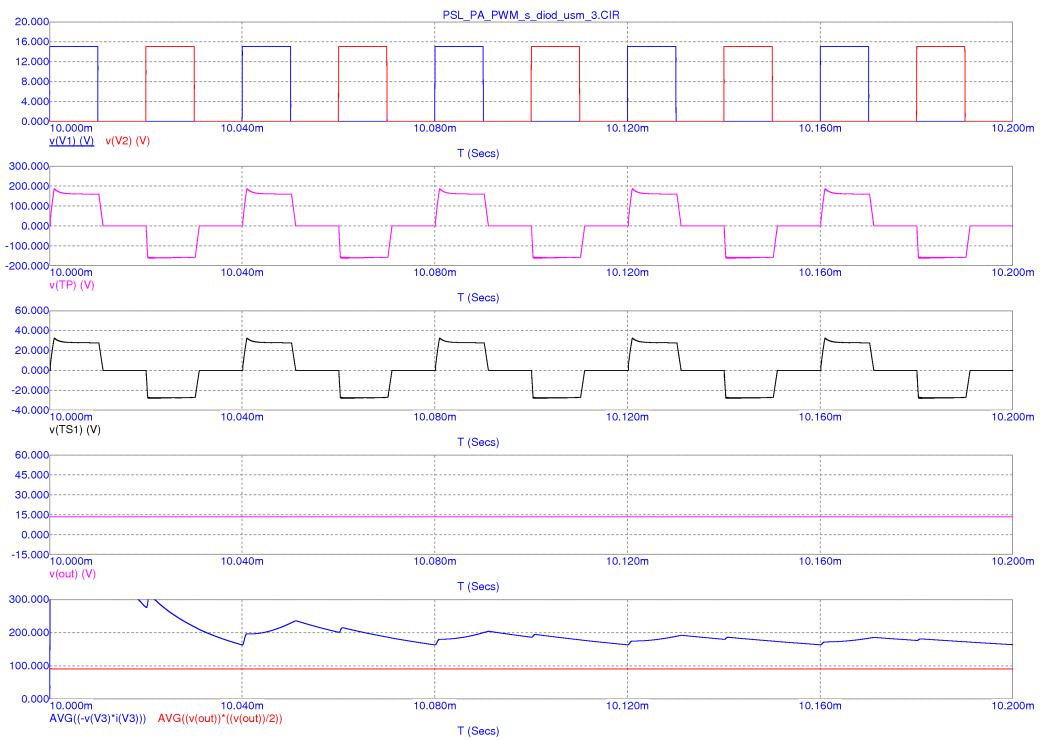
výstupní proud se blíží 15A. Poslední graf znázorňuje průměrný příkon a výkon zdroje.



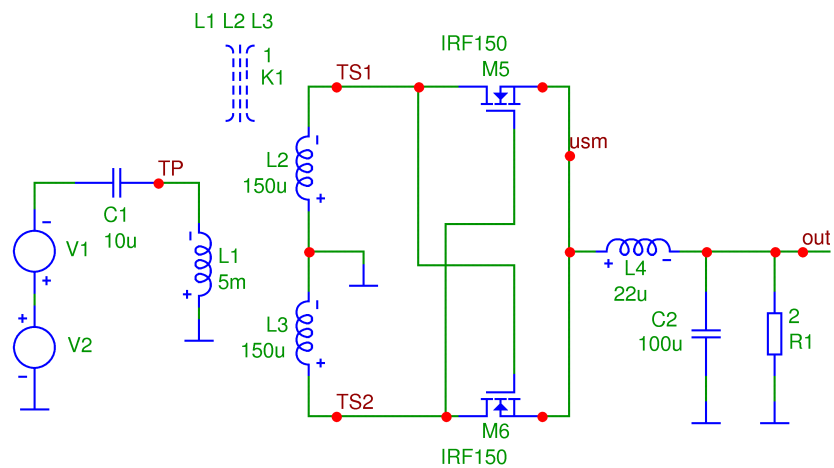
Obrázek 7.2: Výstupní napětí a proud při maximální střídě spínání tranzistorů

Na obrázku 7.3 je simulace pro střidu signálu 50%. Obě hodnoty, napětí i proud, klesly na polovinu oproti plné střídě signálu.

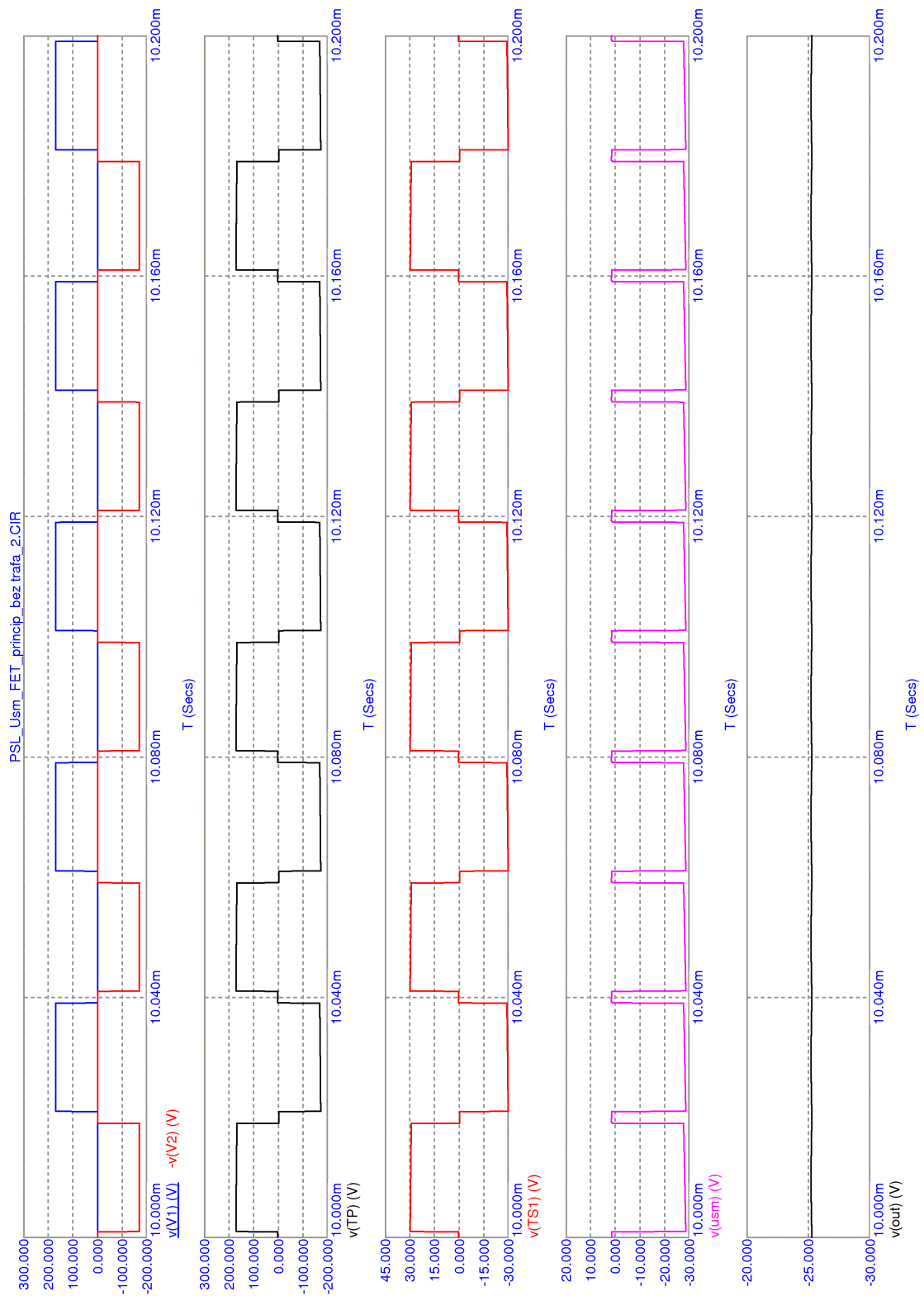
Na obrázku 7.4 je model zdroje simulován s výstupním usměrňovačem tvořeným FET tranzistory. Na základě simulací uvedených na obrázku 7.5 bylo ověřeno, že při větších výstupních napětích než cca 15V dochází u tranzistorů k nebezpečí překročení povoleného napětí  $V_{GS}$  (typicky od  $\pm 20V$  do  $\pm 30V$ ). Pro navrhovaný zdroj je požadováno napětí značně vyšší. Ošetření pasivními součástkami nezajistí dostatečnou strmost impulsů mezi elektrodami GATE a SOURCE tranzistorů MOSFET (negativně se projeví Millerova kapacita), což vede ke zvýšení spínacích ztrát a při úvaze o buzení k tomu určenými driversy se objeví požadavek na další pomocný zdroj a zapojení usměrňovače se značně zkomplikuje. Tím se výhody proti klasickým diodám stírají. Zapojení usměrňovače s tranzistory MOSFET může být výhodné u zdrojů malých napětí (do cca 15V) s požadavkem na velké odebírané proudy.



Obrázek 7.3: Výstupní napětí a proud při 50% střídě spínání tranzistorů



Obrázek 7.4: Zjednodušené zapojení navrhovaného zdroje s tranzistorovým usměrňovačem



Obrázek 7.5: Výstupní napětí a proud při maximální střídě spínání tranzistorů

## Kapitola 8

# Návrh a osazení DPS

Deska byla navržena v programu Eagle 4.16r2 podle konečného schématu zapojení uvedeného v příloze B.2. Navržené DPS a osazovací výkresy jsou uvedeny v příloze C a D.

Z funkčních důvodů je schéma rozděleno na dvě části. První částí jsou vstupní síťové a řídicí obvody (před oddělovacím transformátorem), které jsou galvanicky spojeny se sítí (dále jen "deska 1"). Druhá část obsahuje výstupní obvody (za oddělovacím transformátorem), obvody zpětné vazby a obvody měření (dále jen "deska 2"). Rozdělením obvodů zdroje na dvě desky tak bude ve stejném smyslu zajištěno bezpečné oddělení vstupní a výstupní části. Zpětná vazba je propojena přes toto rozhraní pomocí oddělovacího optočlenu a na desce bude zajištěna dostatečná vzdálenost oddělených částí.

### 8.1 Výkonový transformátor

Transformátor má 1 jednoduché primární vinutí a 2 sekundární vinutí, zapojená do série. Primární vinutí má 50z, sekundární vinutí tvoří 4x5 závitů vinutých současně v 1 vrstvě se samostatnými vývody, což umožňuje zapojit 2 bifilární vinutí do série (2x2 bifilárně vinutí pro výstupní napětí zdroje do cca 15V) nebo zapojit 2+2 vinutí do série (2x10z) pro výstupní napětí zdroje do cca 25V. Pro všechna vinutí je použito vf lanko 135x0.08mm, jehož použití výrazně minimalizuje ztráty způsobené vlivem skinefektu (více např. v [13]).

Použité jádro je z materiálu 3C90, změřená konstanta  $A_L$  je přibližně 4000nH/z<sup>2</sup> (bez vzduchové mezery). Okénko pro vinutí na kostře je 48x5.5mm. Tomuto byl uzpůsoben návrh transformátoru uvedený v kapitole 6.3.

Indukčnost primárního vinutí byla zvolena  $L_1=5\text{mH}$ .

Pro obdélníkový průběh s dobou trvání impulsu  $20\mu\text{s}$  a vstupní napětí 160V<sub>max</sub> pak platí

$$I_m = \frac{U_m \cdot \Delta t}{L_1} = \frac{160 \cdot 20e^{-6}}{5e-3} = 0.64A \quad (8.1)$$

Takto vypočítaný proud odpovídá magnetizačnímu proudu zatíženého transformátoru a určuje magnetické sycení jádra

$$L \cdot I_1 = N \cdot \phi_m = N \cdot B_m \cdot S_{ef}, \quad (8.2)$$

kde  $\phi_m$  je maximální hodnota magnetického toku a  $S_{ef}$  je efektivní průřez jádra.

Převod mezi primárním a sekundárním vinutím byl předběžně stanoven výpočtem a upřesněn na základě simulací a konečných měření

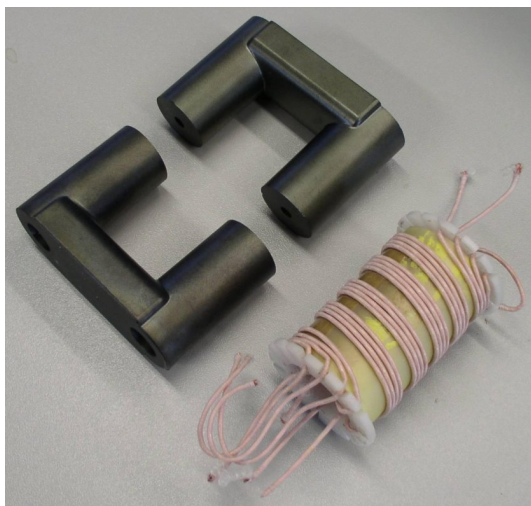
$$n = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_{1max}}{U_{2max}} = \frac{160}{25} = 5 \quad (8.3)$$

Má-li primární vinutí 50z, pak

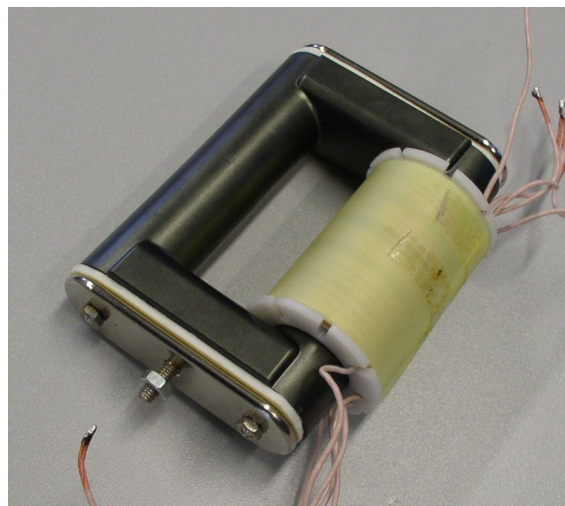
$$B_m = \frac{L \cdot I_1}{N \cdot S_{ef}} = \frac{5e^{-3} \cdot 0.64}{50 \cdot 290e^{-6}} = 0.221T \quad (8.4)$$

Pro feritová jádra tohoto typu lze využít sycení až do 0.30 - 0.35T bez nebezpečí vzrůstu ztrát a poklesu permeability vlivem přesycení jádra. Vypočtenou hodnotu tedy lze považovat za vyhovující.

Použité jádro a kostra s navinutým primárním a ještě nezajištěným a nezabandážovaným sekundárním vinutím je na obrázku 8.1. Na obrázku 8.2 je zobrazen sestavený transformátor.



Obrázek 8.1: Použité jádro transformátoru U64 a pohled na sekundární vinutí



Obrázek 8.2: Sestavený výkonový pulzní transformátor

Transformátor byl sestaven, jádro zajištěno kovovými destičkami podloženými izolačním materiálem a staženo dvěma svorníky z nemagnetického materiálu. Navržená indukčnost primárního vinutí byla dostavena nastavením vzduchové mezery mezi oběma polovinami jádra pomocí vložek z transformátorového papíru, který se používá na prokládání vinutí.

## 8.2 Sít'ová část

Deska 1 byla osazena podle rozpisky součástek (příloha F.1) a osazovacího výkresu (příloha D.1). Protože nebyla z technických důvodů zhotovena deska s prokvy, bylo nutné některé vývody součástek pájet s obou stran desky.

Vzhledem k tomu, že v použitém sít'ovém konektoru je zabudován odrušovací sít'ový filtr, byla odrušovací tlumivka  $L1$  nahrazena propojkami.

Použitý proudový transformátor *TR2* je navinut na feritovém jádře neznámého původu potaženém izolační hmotou. Rozměry jsem naměřila  $D=12.9\text{mm}$ ,  $d=6.8\text{mm}$ ,  $h=6.2\text{mm}$ . Indukčnost sekundárního vinutí je  $14.3\text{mH}$ , je na něm navinuto 61z.

Pro indukčnost vinutí na feromagnetickém jádře platí

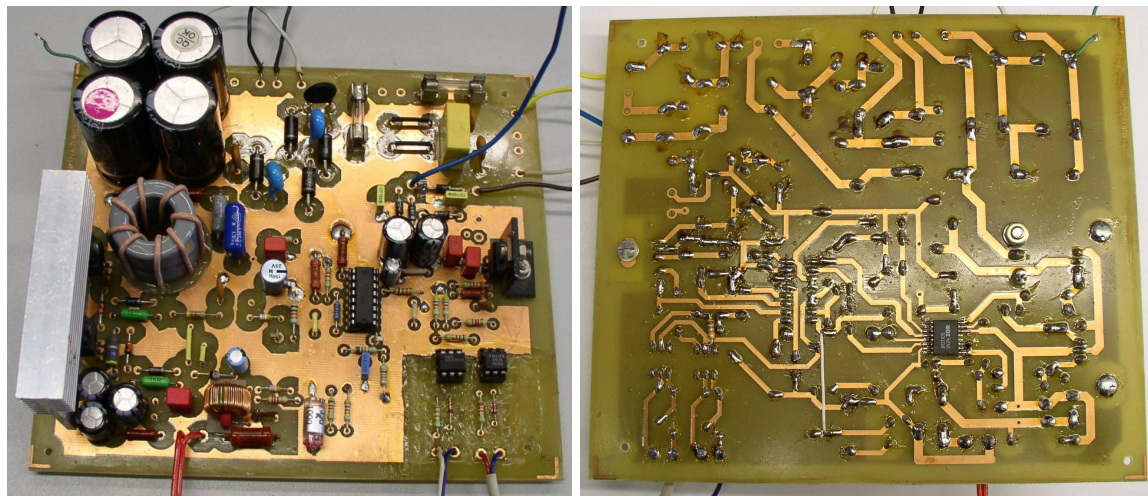
$$L = Al \cdot N^2 \Rightarrow Al = \frac{L}{N^2} = \frac{14.3 \cdot 10^{-3}}{61^2} = 3840\text{nH/z}^2 \quad (8.5)$$

Z mechanických rozměrů toroidního jádra lze stanovit přibližně  $l_s=30\text{mm}$ ,  $S_{ef}=19\text{mm}^2$ . Pro uzavřený magnetický obvod, tedy i toroidní jádro lze potom psát

$$Al = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot S_{ef}}{l_s} \Rightarrow \mu_r = \frac{Al \cdot l_s}{\mu_0 \cdot S_{ef}} = \frac{3840 \cdot 10^{-9} \cdot 30 \cdot 10^{-3}}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 19 \cdot 10^{-6}} = 4825 \quad (8.6)$$

Pro proudový transformátor není hodnota  $\mu_r$  kritická, ale jeho vysoká hodnota je výhodná, transformátor má větší činitel vazby  $k$  a menší magnetický rozptyl.

Výstupní napětí odporového děliče *R20*, *R21* bylo zvoleno přibližně do středu rozsahu výstupního napětí optočlenu *IO10*. Děličem *R18* a *R19* je určen napěťový práh pro funkci obvodu pro vyhodnocení nadproudového přetížení (úroveň *LLIM*). Obvody *IO10-IO12* a *IO14* nebyly zatím osazeny. Rezistor *R30* umožňuje snížení citlivosti nadproudové ochrany na principu snímání proudu na *R28* a nebyl rovněž osazen. Koncové tranzistory *T1* a *T2* byly osazeny rovněž až během ožívování desky.

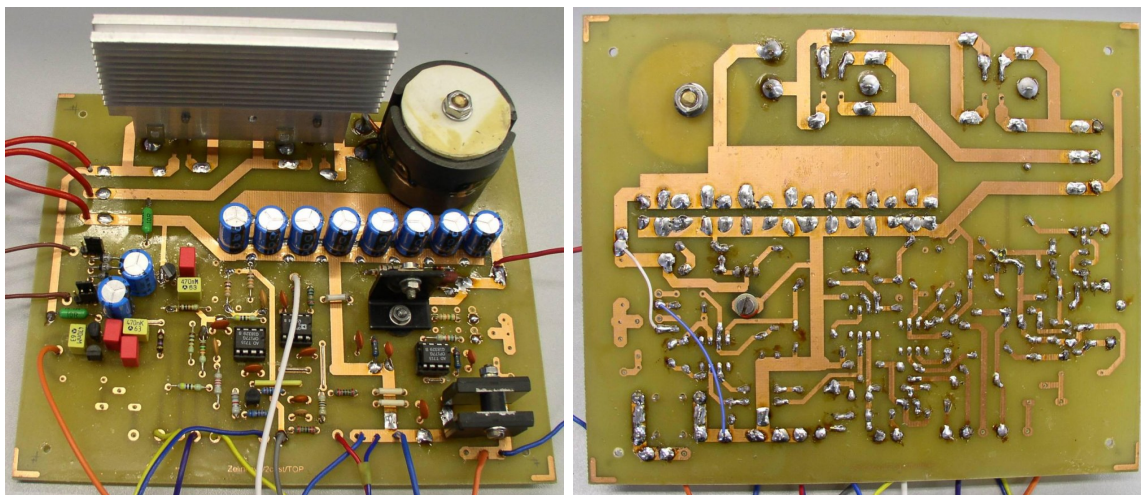


Obrázek 8.3: Osazená deska sít'ových obvodů

### 8.3 Výstupní část

Deska 2 byla navržena pro možnost osazení pro obě výstupní polarity napětí, osazena a testována byla ve verzi s kladným výstupním napětím podle rozpisky součástek (příloha F.2) a osazovacího výkresu (příloha D.2). Spoje pro velké proudy jsou vedeny souběžně v obou vrstvách. Protože nebyly zhotoveny desky s prokovenými otvory, byly ve výkonových spojkách obě vrstvy na více místech propojeny drátovými propojkami, aby bylo zabezpečeno





Obrázek 8.4: Osazená deska výstupních obvodů

rovnoměrné proudové zatížení obou vrstev. U ostatních obvodů byly prokovy nahrazeny pájením vývodů součástek z obou stran desky, pokud to bylo možné.

Pro sestavení a upevnění tlumivky *L61* byl použit mosazný svorník, železný by mohl negativně ovlivnit magnetické vlastnosti jádra.

Snímací odpor pro měření výstupního proudu je realizován paralelním zapojením dvou výkonových 4 vývodových rezistorů  $20\text{m}\Omega$  (*R102* a *R103*). Diody *D70* a *D71* jsou pro zlepšení odvodu tepla uchyceny přímo na chladič bez izolace, pouze s použitím pasty na chladiče. V této verzi osazení desky to je možné, poněvadž na jejich chladičí a současně upevňovací plošky jsou vyvedeny katody diod a ty jsou u kladné verze zdroje přímo propojeny i ve schématu.

Původně uvažovaná alternativa s výkonovým dvojcestným usměrňovačem se 2 tranzistory MOSFET (příloha B.3) nebyla použita. Viz kapitola 7.

## Kapitola 9

# Konstrukce zdroje

Zdroj je vestavěn do kovové skříně z vyřazeného signalizačního zařízení.

V případě potřeby je počítáno s nuceným chlazením pomocí ventilátoru, otvory s ochrannými mřížkami jsou umístěny na protilehlých stranách skřínky. Místo pro ventilátor bylo vyhrazeno na pravé straně skřínky (při pohledu na ovládací prvky zepředu).

Na čelním panelu je umístěn sít'ový dvojpólový vypínač se zabudovanou indikační doutnavkou, dva panelové displeje pro měření napětí a proudu, potenciometry pro regulaci napětí a omezení proudu. Vpravo jsou umístěny výstupní svorky a svorka zemnicí. Dále je počítáno s místem pro diodu LED indikující přetížení a další diodu LED zapojenou přes rezistor přímo mezi výstupní svorky, která orientačně indikuje přítomnost a velikost výstupního napětí. Sít'ová panelová vidlice se zabudovaným odrušovacím filtrem a hlavní sít'ová tavná pojistka jsou umístěny na zadní stěně skřínky (výkresy pro vrtání otvorů jsou uvedeny v příloze E).

Kostra skřínky je spojena s ochranným sít'ovým vodičem.



Obrázek 9.1: Pohled na skříň zdroje



## Kapitola 10

# Oživení zdroje

### 10.1 Deska 1

Protože téměř celá vstupní část je přes můstkový usměrňovač spojena galvanicky se sítí, bylo nutné věnovat mimořádnou pozornost dodržování pravidel z hlediska nebezpečí možnosti úrazu elektrickým proudem. Při měření je nutno použít měřicí přístroje s plovoucí zemnicí svorkou (bateriové), jinak je použití oddělovacího síťového transformátoru odpovídajícího výkonu nezbytné. Pro oživovací pokusy byl využíván oddělovací transformátor s výkonem cca 200W i regulační autotransformátor a do série se síťovým přívodem byl zapojen sériový ochranný rezistor (žárovka 225V/200W, pro větší výkony žehlička 230V/1000W). Svorky pro obvod PFC byly provizorně překlenuty propojkami.

#### Kontrola síťové části

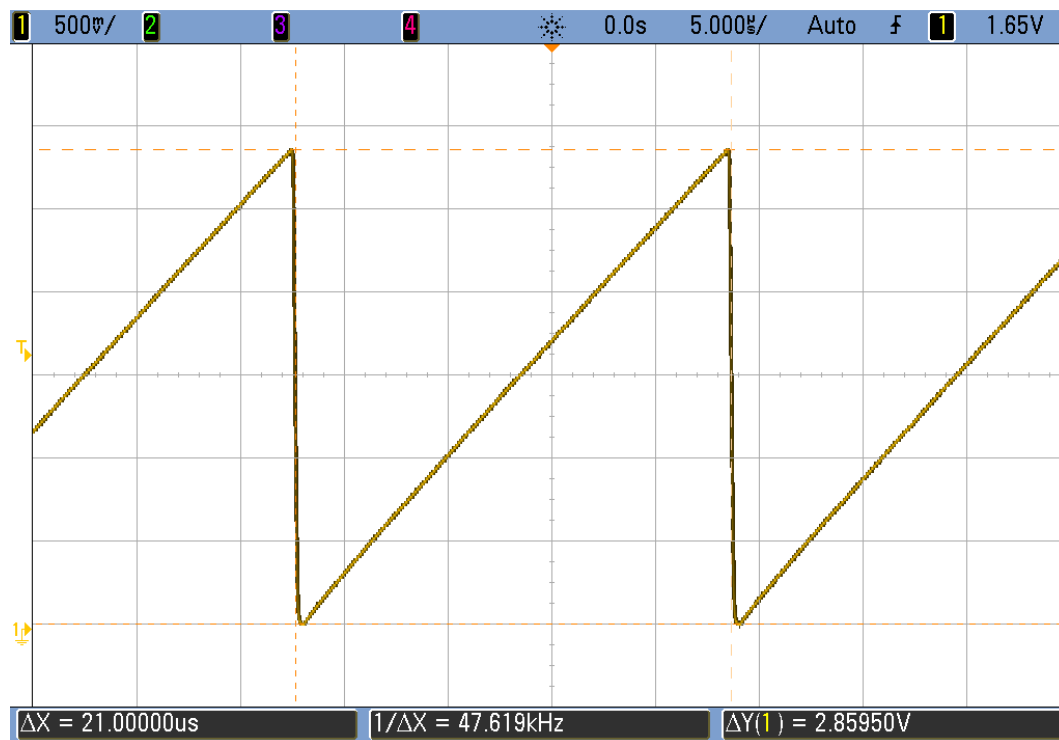
Síťové napětí bylo připojeno na konektor *X1*, koncové tranzistory *T1* a *T2* byly nezapájeny, obvody *IO12* a *IO14* neosazeny. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce 10.1.

Bod měření	Proti bodu	Napětí	Poznámka
Síťový přívod	X1	230 Vstř	Nastaveno autotransformátorem
X2	X5	324 Vss	
X3	X5	162 Vss	
X14	X15	17.4 Vstř	
IO1-1	X7	22.8 Vss	
IO1-3	X7	14.9 Vss	+UP

Tabulka 10.1: Tabulka hodnot naměřených při oživování vstupní části zdroje.

#### Kontrola frekvence PWM

Při tomto měření byl již osazen obvod *IO12* a byl zapnut pomocný zdroj s označením *+UP*. V bodě *X35* (*IO12*, pin5) byl kontrolován pilový průběh, který se porovnává s referenční úrovní v obvodu *IO12* při vytváření PWM. Amplituda průběhu byla přibližně 2.9V (viz. obrázek 10.1).



Obrázek 10.1: Pilový průběh v bodě  $X35$  ( $IO12$ , pin5)  
(rozsah 500mV/dílek, časová základna  $5\mu\text{s}$ /dílek)

Pomocí úpravy hodnot kondenzátoru  $C18$  na 1n8 a odporu  $R22$  na 15K byla jeho perioda nastavena přibližně na  $21\mu\text{s}$ , tomu odpovídá frekvence cca 48kHz. Protože koncový stupeň je ve dvojčinném zapojení, výsledná opakovací frekvence pulzů na výstupním transformátoru bude poloviční, tedy přibližně 24kHz. Volba vhodné pracovní frekvence byla již částečně diskutována při návrhu zdroje v odstavci 2.3. Nižší frekvence by ležela v akustickém pásmu a mohla by být příčinou nepříjemného pískání zdroje, při vyšší frekvenci by sice principiálně bylo možné dosáhnout požadovaného výkonu s menším transformátorem a filtrace s menšími indukčnostmi a kapacitami, ale vzrostly by nároky na dynamické vlastnosti spínacích a usměrňovacích prvků, zvýšily by se ztráty vlivem skin efektu na vinutí transformátoru a snížil by se rozsah řízení výstupního napětí pomocí PWM. Rovněž by se negativně projevil parazitní veličiny některých součástek, zejména frekvenční závislost impedance elektrolytických kondenzátorů. Jako optimální se proto jeví frekvence okolo 25kHz.

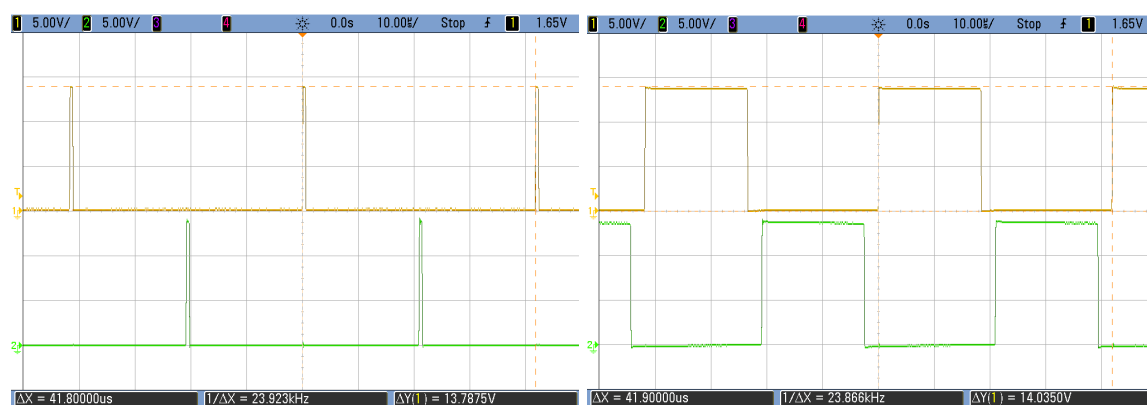
### Kontrola referenčních napětí

Velikost vnitřního referenčního napětí na  $IO12$ , pin 14 byla  $U_{ref}=4.98\text{V}$ . Referenční napětí pro proudové omezení na  $IO12$  pin 15 bylo 0.49V, vztahné napětí na neinvertujícím vstupu zesilovače pro řízení PWM bylo 2.26V.

## Kontrola funkce obvodu PWM

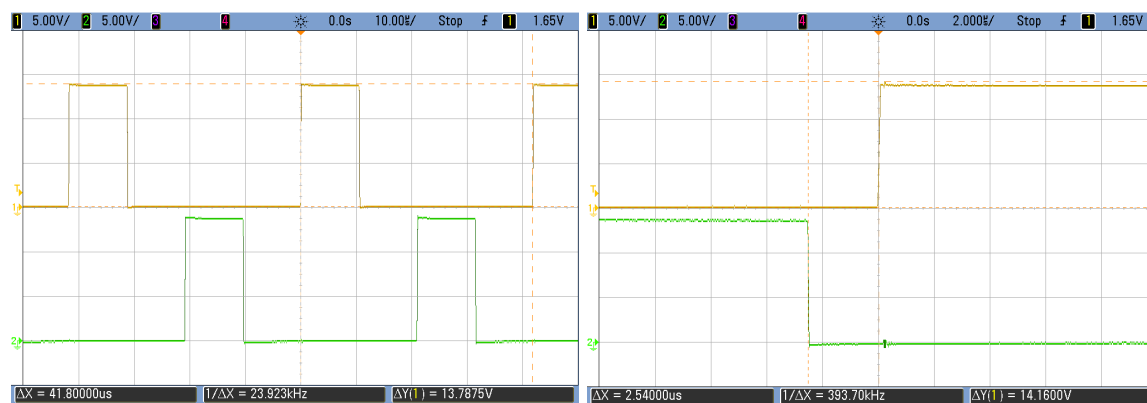
Obvod byl zapojen stejně jako v části kontroly frekvence PWM, navíc byl na vstupní svorky *X10* a *X11* optočlenu *IO10* připojen regulovatelný pomocný ss zdroj, dvoukanálovým osciloskopem byly snímány průběhy napětí na výstupech *IO12* (piny 9 a 10). Průběhy jsou obdélníkové a navzájem fázově posunuty o  $180^\circ$ . Při změnách napětí na vstupních svorkách optočlenu *IO10* se musí šířka pulzů v obou větvích souhlasně měnit. Sejmuté průběhy pro různě nastavené šířky pulzů jsou na obrázcích 10.21 až 10.5. Na osciloskopu je nastaven rozsah 5V/dílek, časová základna  $10\mu\text{s}/\text{dílek}$  u obrázků 10.21, 10.22 a 10.4) a  $2\mu\text{s}/\text{dílek}$  u obrázků 10.5.

Z osciloskopických záznamů lze odečíst, že minimální mezera mezi pulzy je cca  $2.55\mu\text{s}$ , maximální šířka pulzů je  $36.8\mu\text{s}$ , perioda  $41.9\mu\text{s}$ . Maximální dosažitelná hodnota šířky pulzů je přibližně 88% a je omezena přímo ve struktuře obvodu *IO12* (TL494).



Obrázek 10.2: Minimální šířka pulzů  
(rozsah 5V/dílek  
čas. zákl.  $10\mu\text{s}/\text{dílek}$ )

Obrázek 10.3: Maximální šířka pulzů  
(rozsah 5V/dílek  
čas. zákl.  $10\mu\text{s}/\text{dílek}$ )



Obrázek 10.4: Střední šířka pulzů  
(rozsah 5V/dílek  
čas. zákl.  $10\mu\text{s}/\text{dílek}$ )

Obrázek 10.5: Detail min. mezery pulzů  
(rozsah 5V/dílek  
čas. zákl.  $2\mu\text{s}/\text{dílek}$ )

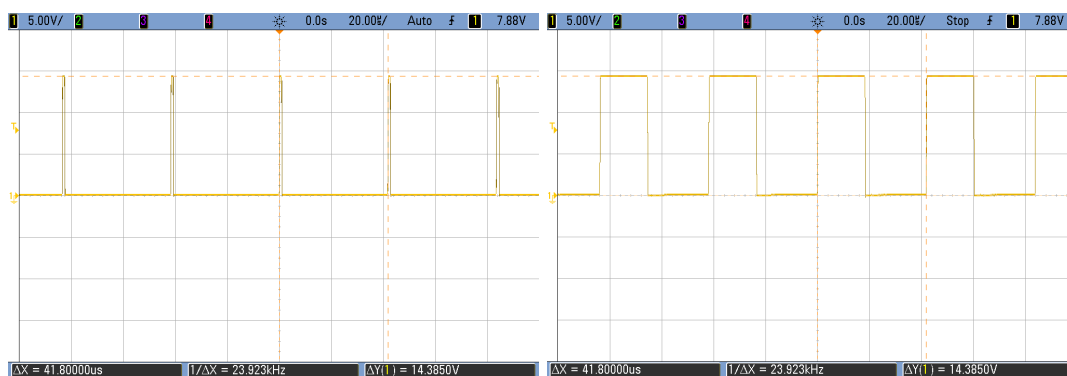
Na obvodu *IO12* byla naměřena napětí uvedená v tabulce 10.2.

Pin	U [V]	Poznámka	Pin	U [V]	Poznámka
1	2.26	Dělič <i>R20</i> a <i>R21</i>	9	3.15	Otevřený E1
2	2.26	-IN (reg.smyčka)	10	3.15	Otevřený E1
3	2.20	COMP	11	14.98	Otevřený C2
4	0	I omez. (neakt.)	12	14.98	VCC
5	1.47	CT	13	4.98	OC pro Push-Pull
6	3.68	RT	14	4.98	Vref (jmen.+5V)
7	0	GND	15	0.49	-IN2 (I ochrana)
8	14.98	Otevřený C1	16	0	ILIM (neaktivní)

Tabulka 10.2: Tabulka naměřených napětí na obvodu *IO12*.

## Kontrola budičích obvodů

Do desky se síťovou částí byl zapájen obvod *IO14* (SMD součástka, ze strany spojů) a zapájen chladič s koncovými tranzistory *T1* a *T2*. Společná vodivá plocha byla z bezpečnostních důvodů spojena se zemí (kolík v síťové zásuvce). Na desku bylo přivedeno přes oddělovací transformátor síťové napětí a bylo přítomno i pomocné napětí  $+UP$ . Na výstupech budiče *IO14* byly osciloskopem sejmuty průběhy, uvedené na obrázcích 10.6 až 10.8.



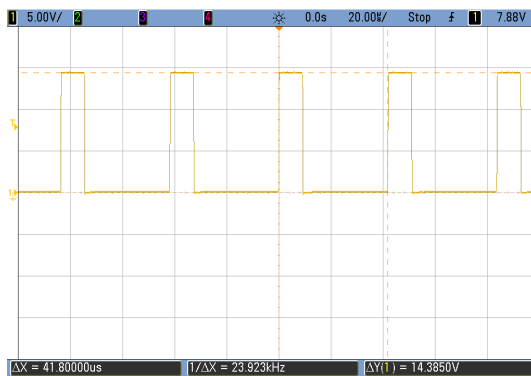
Obrázek 10.6: Minimální šířka pulzů na výstupu LO obvodu *IO14* (rozsah 5V/dílek, čas. zákl. 20μs/díl.)

Obrázek 10.7: Maximální šířka pulzů na výstupu LO obvodu *IO14* (rozsah 5V/dílek, čas. zákl. 20μs/díl.)

Na obrázcích 10.9 až 10.11 jsou znázorněny průběhy na výstupech HO a VS u *IO14* a jejich osciloskopem vypočítaný rozdíl, který představuje budičí napětí pro tranzistor *T1*. Toto výsledné napětí má obdélníkový průběh s amplitudou přibližně 11V. Nulové úrovně jsou u průběhů HO a VS pro větší názornost zobrazení navzájem úmyslně posunuty.

## 10.2 Deska 2

Pro první experimenty s touto deskou nebyly připojeny měřicí displeje. Nebyly osazeny operační zesilovače *OZ61-OZ63* a propojky *J61* a *J62* byly vyjmuty. Na svorky *X61,X62* a *X63* (určené pro připojení sekundárního obvodu transformátoru) byl připojen výstup pomocného transformátoru s napětím cca 2x 20Vstř/50Hz. Na výstupu *X67* bylo proti



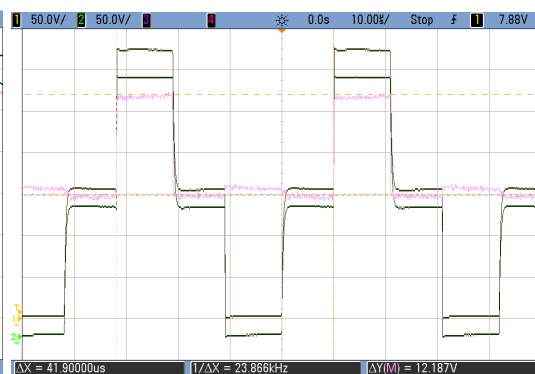
Obrázek 10.8: Střední šířka pulzů na výstupu LO obvodu *IO14* (rozsah 5V/dílek, čas. zákl. 20μs/díl.)



Obrázek 10.9: Minimální šířka pulzů na výstupech HO a VS obvodu *IO14* (rozsah 50V a 5V/dílek, čas. zákl. 10μs/dílek)



Obrázek 10.10: Maximální šířka pulzů na výstupech HO a VS obvodu *IO14* (rozsah 50V a 5V/dílek, čas. zákl. 10μs/dílek)



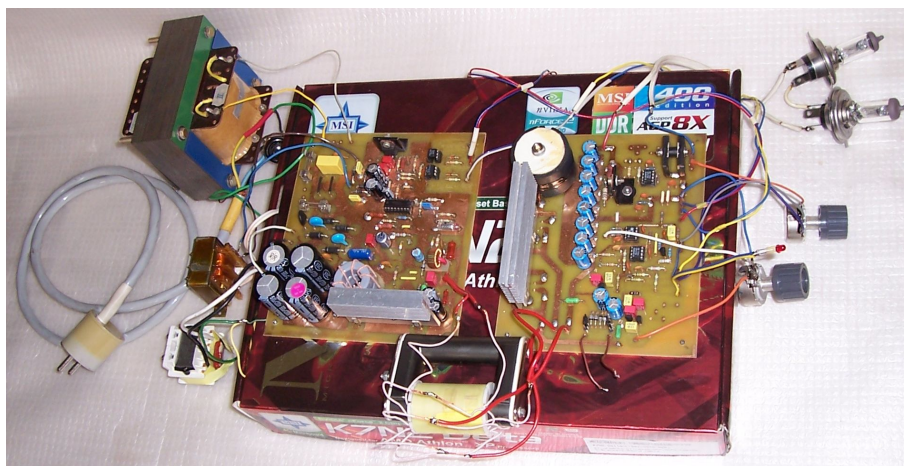
Obrázek 10.11: Střední šířka pulzů na výstupech HO a VS obvodu *IO14* (rozsah 50V a 5V/dílek, čas. zákl. 10μs/dílek)

svorce  $X70$  změřeno napětí 26.5V, na odporu  $R66$  bylo napětí 0.65 V. Tomu odpovídá proud předzátěží 65mA. Tím byla ověřena funkce usměrňovače a předzátěže. Pak byly vloženy propojky  $J61$  a  $J62$  do poloh 1-2 (interní pomocné napájení). Na výstupu  $IO61$  bylo naměřeno napětí  $+U_{POM} = +15.03V$ , na výstupu  $IO62$  bylo přítomno napětí  $+REF = +5.01V$ . Na výstupu  $IO63$  bylo kontrolováno napětí  $-U_{POM} = -14.94V$ . Tímto byla ověřena správná funkce stabilizátorů napětí pro napájení integrovaných obvodů v obvodech regulační smyčky a referenčního napětí pro regulaci.

### 10.3 Celkové oživení zdroje

Pro usnadnění přístupu k propojeným deskám během oživování byl použit provizorní montážní rám zhotovený z ploché krabice z tvrdého papíru, do níž byly vystřiženy otvory pro snadné umožnění přístupu k oběma deskám i ze strany spojů.

Montážní rám i s deskami je na obrázku 10.12. Vstupní napětí je přivedeno na desku přes oddělovací transformátor. Pulzní transformátor je položený na rámu v přední části obrázku. Vlevo od krabice jsou umístěny tlumivka pro PFC a pomocný malý transformátor pro napájení řídicí elektroniky. Na výstupu zdroje jsou připojeny dvě autožárovky v sérii.



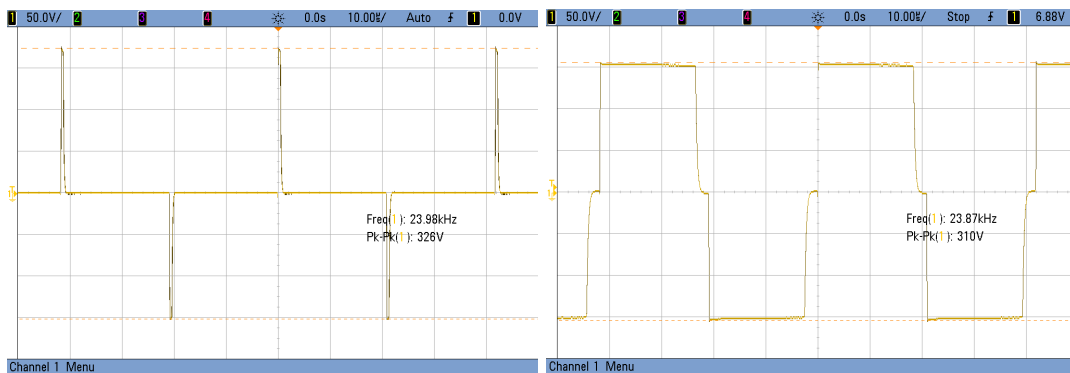
Obrázek 10.12: Provizorní montážní rám s deskami pro oživování

Deska vstupních obvodů byla kompletně osazena, mezi svorky  $X1$  a  $X2$  byla připojena tlumivka (PFC) a na její výstup (svorky  $X32$  a  $X33$ ) byla jako zátěž připojena žárovka 230V/60W. Na vstupní svorky  $X10$  a  $X11$  optočlenu  $IO10$  byl připojen regulovatelný pomocný ss zdroj.

Po připojení sítě na  $X1$  bylo možné napětím pomocného zdroje na vstupu optočlenu  $IO10$  regulovat svit žárovky na výstupu od nuly až po maximum. Současně byly kontrolovány oscilogramy na zátěži pro různá nastavení šířky pulzů. Průběhy jsou uvedeny na obrázcích 10.13 až 10.15.

Potom byl připojen jako zátěž transformátor. Jeho výstup byl zatížen dvěma autožárovkami 12V/55W v sérii, zapojenými na polovinu sekundárního vinutí.

Aby při snímání oscilogramů byla jedna svorka primárního vinutí transformátoru spojena se zemí, bylo při následujícím oživování využito připojení transformátoru mezi svorky  $X32$  a  $X33$  na sít'ové desce. Jinak by zemní svorka osciloskopu byla na potenciálu cca 160V,



Obrázek 10.13: Průběh napětí v bodech  $X32$ ,  $X33$ , úzké pulzy  
(rozsah 50V/dílek, čas. zákl. 10μs/d.)

Obrázek 10.14: Průběh napětí v bodech  $X32$ ,  $X33$ , široké pulzy  
(rozsah 50V/dílek, čas. zákl. 10μs/d.)



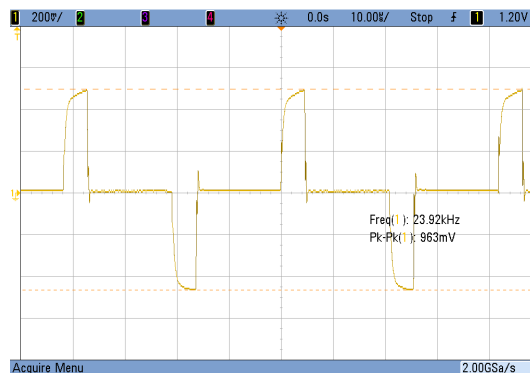
Obrázek 10.15: Průběh napětí v bodech  $X32$ ,  $X33$ , střední šířka pulzů  
(rozsah 50V/dílek, čas. zákl. 10μs/dílek)

což by mohlo být nebezpečné pro osciloskop i jeho obsluhu. Pro konečné zapojení se počítá s alternativním připojením transformátoru mezi svorky  $X32$  a  $X3$ .

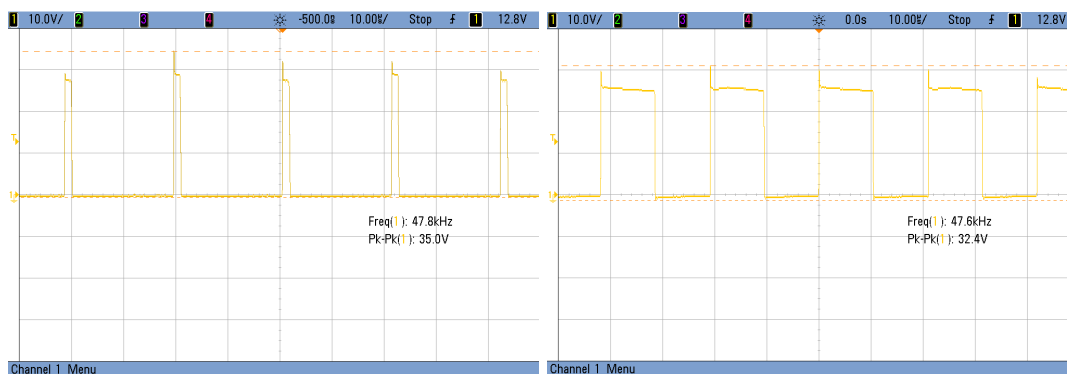
Na vstupní svorky  $X10$  a  $X11$  optočlenu  $IO10$  byl opět připojen regulovatelný pomocný ss zdroj. Po připojení sítě na  $X1$  bylo možné napětím pomocného zdroje na vstupu optočlenu  $IO10$  regulovat svět žárovek na výstupu od nuly až po maximum. Současně byly opět kontrolovány oscilogramy pro různá nastavení šířky. Průběhy byly v souladu s obrázky 10.13 až 10.15, pouze se na koncích hran impulzů objevily menší zákmity, které se s rostoucí šířkou impulzů zmenšovaly. Tím byly ověřeny základní funkce síťové desky.

Dále bylo propojeno sekundární vinutí výkonového transformátoru se svorkami  $X61$ - $X63$  na desce 2. Zatěžovací autožárovky byly připojeny na výstup zdroje na svorky  $X67$  a  $X70$  a předchozí postup s regulací přes optočlen  $IO10$  pomocí externího zdroje byl zopakován. Jas žárovek bylo opět možné regulovat v plném rozsahu, od zániku impulzů až do 90% jejich šířky. Průběhy napětí byly opět prakticky shodné s obrázky 10.13 až 10.15, pouze při užších pulzech se na koncích jejich hran objevily menší zákmity, způsobené zřejmě rozptylovou indukčností transformátoru.

Dále byly pro ověření předpokladů ze simulací sejmuty oscilogramy z důležitých bodů obou desek (obrázky 10.16 až 10.18).



Obrázek 10.16: Sít'ová deska, rezistor R34 (výstup proud. transformátoru) (rozsah 200mV/dílek, čas. zákl. 10μs/dílek)



Obrázek 10.17: Výstupní deska, vstup L61, nastaveny úzké pulzy (rozsah 10V/dílek, čas. zákl. 10μs/d.)  
 Obrázek 10.18: Výstupní deska, vstup L61, nastaveny širší pulzy (rozsah 10V/dílek, čas. zákl. 10μs/d.)

Propojky *J61* a *J62* byly umístěny do polohy 1-2 (interní pomocné napájení). Byly opět kontrolovány hodnoty napětí  $+U_{POM}$ ,  $-U_{POM}$  a  $+REF$  a jejich nezávislost na nastavené šířce pulzů. Ovšem při nastavení pod mez zániku impulzů tato napětí k dispozici nejsou, určitá minimální šířka pulzů je nutná. Protože amplituda pulzů se s jejich šířkou nemění a odběr proudu z pomocných stabilizátorů je v řádu desítek mA, je jejich funkce zajištěna i při velmi malé šířce pulzů, což bylo experimentálně ověřeno.

V poslední fázi oživování byly propojeny vstupní obvody optočlenů *IO10* (*X10*, *X11*) a *IO11* (*X12*, *X13*) s odpovídajícími výstupy na desce 2 (*X79*, *X80* a *X75*, *X76*). Rovněž byla připojena LED dioda pro indikaci přetížení na svorky *X81* a *X82*. Operační zesilovače *OZ61*-*OZ63* byly zasunuty do patič. Dále byl připojen potenciometr pro řízení výstupního napětí a potenciometr pro nastavení proudového omezení.

Po zapojení sít'ového napětí zdroj nepracoval, impulzy na výstupu PWM nebyly přítomny. Příčina byla rychle odhalena - aby pracovala smyčka zpětné vazby, musí mít obvody zesilovačů napájení a to po zapnutí zdroje nemají, protože smyčka nepracuje a generování impulzů je zablokováno. Nabízí se více řešení tohoto problému.

Nejjednodušší a nejspolehlivější, ale ne nejlevnější a prostorově nejvýhodnější je použití dalšího pomocného malého sít'ového transformátoru se symetrickým vinutím připojeným



na svorky *X64*, *X65* a *X611* (střed) na desce 2 a propojky *J61* a *J62* umístit do poloh 2-3. Pak je možné zdroj regulovat až do téměř nulového výstupního napětí i s minimální předzátěží.

Další možností je přepojit rezistor *R12* do kolektoru optočlenu *IO10* a osadit *R83* a *R84* místo *R82* a *R85* na vstupu zesilovače odchylky *OZ61*. Pak má ale zdroj po zapnutí tendenci překmitnout na vyšší než nastavené napětí a při rozpojení smyčky zpětné vazby nebo poruše optočlenu se na výstupu zdroje objeví plné napětí, protože se šířka budících impulzů nastaví na maximum.

Pro další testování zdroje jsem zvolila jiné, kompromisní řešení, a to přemostění optočlenu *IO10* rezistorem *R6*, který za všech okolností zabezpečí alespoň minimální šířku pulzů. Další přídavný transformátor pro napájení pomocných obvodů pak není nutný. V důsledku toho nebude možné nastavit výstupní napětí zdroje až na nulovou hodnotu.

### Stabilita zpětnovazební smyčky pro nastavení výstupního napětí

Před realizací obvodů zpětné vazby byla realizována řada simulací celého obvodu na zjednodušeném schématu. Jedna ze simulací, pro maximální výstupní napětí, je uvedena v příloze A.

Protože pro *IO12* byl v knihovně k dispozici pouze obvod s inverzní funkcí PWM na řídicím napětí oproti použitému typu TL494, byl do schématu pro simulaci ještě zařazen pomocný invertor *X6* se zdrojem *V2*. Některé parametry obvodových prvků byly odhadnuty podle typických katalogových hodnot součástek a proto je nutné je považovat pouze za orientační. Například velikost ESR výstupních kondenzátorů (*R2* pro *C71*) má přímo úměrný vliv na zvlnění výstupního napětí. Rovněž experimenty se stanovením účinnosti zdroje simulací vedly k rozdílným výsledkům pro různé hodnoty, typy a modely součástek, zejména *T1*, *T2* a *D70*, *D71* (schottky nebo rychlé diody) a *R3*. Rozdíly dosahovaly až 10%. Získané průběhy odpovídají předpokladům, stejnosměrná napětí ve zpětnovazební části obvodu při ustáleném stavu se pohybují v aktivní oblasti rozsahu operačních zesilovačů.

Celá trasa zpětnovazební smyčky byla navržena jako co nejrychlejší, bez zbytečných časových konstant na nízkých kmitočtech. Jednotlivé operační zesilovače byly přemostěny pouze malými kapacitami (100pF) pro kompenzaci parazitní kapacity v součtovém uzlu v invertujícím vstupu zesilovače. Tím lze zajistit kmitočtovou stabilitu jednotlivých stupňů. Významný vliv na charakteristiku otevřené smyčky má i výstupní filtr tvořený *L61* a *C71*-*C78*. Jeho zlom s případným rezonančním převýšením při malé zátěži se pohybuje v oblasti stovek Hz (viz. [5]). Hlavní kmitočtová kompenzace byla umístěna do stupně s *OZ62*, ve kterém je statické stejnosměrné zesílení omezeno pouze ziskem samotného *OZ62* s otevřenou smyčkou a stupeň pak pracuje jako integrátor s časovou konstantou danou *R88* a *C83* a omezením konečného útlumu poměrem *R88* a *R90*. Tím bylo dosaženo jednoho dominantního zlomu v charakteristice otevřené smyčky a zabezpečení polohy druhého a případných dalších zlomů pod osou s jednotkovým zesílením a tím zajištění stability celé smyčky.

Stabilita smyčky byla napřed testována s  $R90=220\Omega$ , stabilní kmitočet byl pro  $C83 \geq 150\text{nF}$ . Při následném zvyšování hodnoty *R90* zůstala stabilita zachována pro  $R90 \leq 15\text{k}\Omega$ .

Byly zvoleny hodnoty  $R90=2\text{k}\Omega$ ,  $C83=470\text{nF}$ , které zajišťují stabilitu smyčky při různých šířkách pulzů i zátěžích, což bylo experimentálně ověřeno. Odezva chování pulzů při skokové změně napětí nebo zátěže byla rychlá a bez patrných překmitů.

Rovněž reakce na potenciometr proudového omezení byla bezproblémová. Pouze vzhledem k napájení pomocných obvodů na desce 2 z generovaných pulzů docházelo při stažení proudu na minimum k zanikání impulzů vlivem blokování vstupu DTC u *IO12* na desce 1.

Proto je vhodné v této konfiguraci omezit i možnost stažení proudového omezení na určitou minimální hodnotu (např. rezistorem v sérii s potenciometrem pro proudové omezení). Indikace režimu, kdy je napěťová smyčka mimo rozsah (při aktivním omezování proudu) je spolehlivě indikována diodou LED mezi svorkami X81 a X82).

Zařízení je tedy možné použít i jako zdroj proudu, např. pro nabíjení automobilových olověných nebo trakčních či zálohovacích NiCd akumulátorů.

## Účinnost

Odběr proudu ze sítě 230V bez pomocného transformátoru a bez zátěže byl 33.6mA.

Jako zátěž byly k dispozici čtyři autožárovky 12V/55W. Pro měření byly využity jejich sériové a paralelní kombinace. Odběr pomocného síťového transformátoru a napájení displejů nebyl započítán, výslednou účinnost celého zdroje, zvláště při velkých zátěžích, ovlivní jen velmi málo. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 10.3.

Uvst.stř [V]	Ivst.stř [A]	Pvst [W]	Uvýst.ss [V]	Ivýst.ss [A]	Pvýst [W]	$\eta$ [%]	Zátěž
							Žárovky [12V/55W]
230	0.280	64.4	12.0	4.88	58.56	91.0	1 samostatně
230	0.567	130.5	12.0	9.74	116.9	89.6	2 paralelně
230	0.867	199.3	12.0	14.6	175.2	87.9	3 paralelně
230	0.557	128.2	24.0	4.92	118.1	92.1	2 v sérii
230	1.135	261.1	24.0	9.77	234.5	89.8	2+2 sérioparal.

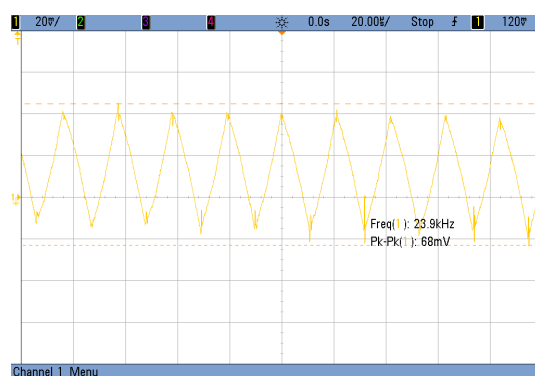
Tabulka 10.3: Tabulka naměřených hodnot účinnosti pro různé zátěže.

## Zvlnění výstupního napětí

Měřeno při zátěži 24V/110W (2 autožárovky 12V/55W v sérii). Průběhy zvlnění jsou uvedeny na obr. 10.19 a 10.20.



Obrázek 10.19: Zvlnění výstupního napětí, složka 100Hz  
(rozsah 20mV/dílek, čas. zákl. 5ms/d.)



Obrázek 10.20: Zvlnění výstupního napětí, složka kmitočtu PWM  
(rozsah 20mV/dílek, čas. zákl. 20μs/d.)

## Indikace hodnot výstupních veličin

Pro měření výstupního napětí a proudu je možné použít jedno měřidlo (analogové ručkové nebo digitální displej) a přepínat měření U/I přepínačem nebo použít dvě samostatná měřidla. V našem případě byly použity 2 samostatné 3 1/2 místné LCD digitální panely HD-3438 s nastavitelnou desetinnou tečkou, automatickou indikací polarity a indikací poklesu napájecího napětí (LOWBAT). Maximální vstupní napětí je 199.9mVss s indikací přeplnění, výška znaku 13mm, rozměr 68x44mm, napájení 6 - 9 Vss/1mA, vstupní impedance větší než 100M $\Omega$ , přesnost zobrazeného údaje  $\pm 0.5\%$ . Rozsah je možné měnit pomocí rezistorů přímo na desce plošného spoje displeje na 200mV, 20V, 200V a 500V. Na zadní straně jsou napájecí body pro napájení LCD panelu a na připojení měřeného napětí.



Obrázek 10.21: Pohled na přední část displeje



Obrázek 10.22: Pohled na desku displeje

Vlevo jsou umístěny 3 propojovací plošky, pomocí kterých lze nastavit polohu desetinné tečky. Původní (horní) propojka je pro 1 desetinné místo. Tu pro požadovaný napět'ový rozsah zdroje ponecháme na původním místě. Vpravo jsou umístěny dva rezistory  $RA$ ,  $RB$  pro nastavení rozsahu. U displeje pro měření napětí zde můžeme přímo navolit rozsah 200V a jeho vstup připojit přímo na výstup zdroje. Hodnoty rezistorů budou tedy  $RA = 10K\Omega$  a  $RB = 10M\Omega$ . Displej pro měření proudu můžeme ponechat v konfiguraci pro maximální citlivost 200mV a přesnou hodnotu dostavit vnějšími rezistory, popř. i potenciometrickým trimrem přímo na desce displeje nebo trimrem, na který je na desce 2 vyhrazeno místo. Desetinné místo můžeme posunout o 1 pozici doleva, tím získáme rozsah do 19.99A (na paralelní kombinaci rezistorů  $R102$  a  $R103$  na desce 2 vzniká úbytek napětí 150mV při  $I_{výst} = 15A$ ). Pro získání přesnějších výsledků byl displej připojen na váhový součet napět'ových svorek rezistorů  $R102$  a  $R103$ . Schéma zapojení desky 2 bylo v tomto smyslu dodatečně upraveno.

U vyhodnocování napětí pro proudové omezení je tento způsob snímání napětí rovněž možný, ale vzhledem k orientačnímu ručnímu nastavování není nutný a mohl by ovlivňovat výsledek měření proudu. Proto nebyl využit.

Ukázalo se, že u většiny typů těchto panelů musí být napájecí napětí plovoucí, jinak displej ukazuje chybné údaje nebo přeplnění. Je to zřejmě způsobeno způsobem zapojení napájení použitého převodníku v displeji vzhledem ke vstupním svorkám, bližší údaje o displeji se mi nepodařilo získat. Vzhledem k velmi malému odběru lze použít destičkové baterie 9V, které při častém používání zdroje mohou být připojeny trvale nebo je lze připojovat k displejům jen při zapnutém zdroji například pomocí relé, které bude napájeno z některého z pomocných napětí. Jinou možností je doplnit malý síťový transformátor se 2 oddělenými vinutími a 2 usměrňovači s vyhlazovacími kondenzátory. Stabilizace výstupních napětí pro displeje není nutná, pokud je dodrženo napájecí napětí v rozmezí jejich specifikace. Nabízí

se možnost podsvícení displejů např. diodami LED, vloženými mezi desku plošného spoje a LCD. Toto podsvícení bude mít ale několikanásobně větší spotřebu než samotný displej, proto je nebude možné napájet dlouhodobě z 9V destičkové baterie. Protože ale napájení podsvícení může být zcela nezávislé, lze použít jakýkoli externí zdroj (z bezpečnostních důvodů raději ne spojený se sít'ovou částí). Možnosti podsvícení displejů nebylo prozatím využito.

Po těchto úpravách zdroj pracoval podle předpokladů a byly na něm realizována základní měření a ověření požadované funkce.

### Poznatky z testů

Navržená koncepce umožňuje řízení výstupního napětí vnějším referenčním napětím místo potenciometru, např. digitálně pomocí elektronického potenciometru nebo D/A převodníku. Vlastnosti oddělovacího optočlenu *IO10* a jejich změny např. stárnutím nemají na přesnost nastavení výstupního napětí vliv. Pokud se spokojíme pouze s ruční regulací výstupního napětí potenciometrem podle údajů měřicích displejů, lze výstupním napětím přímo regulovat přes potenciometr vstup optočlenu *IO10*. Zapojení se tím značně zjednoduší, vliv vlastností *IO10* na výstupní napětí zdroje bude ale značný.

Pro symetrickou verzi zdroje je třeba osadit další desku 2 s úpravami pro zápornou verzi (alternativní osazení diodami *D61*, *D62* místo *D70*, *D71* - footprinty pro ně jsou připraveny na opačné straně chladiče, opačná polarita některých elektrolytických kondenzátorů, alternativní osazení *R83*, *R84* místo *R82*, *R85* a dále *R78*, *R79* místo *R77*, *R80*, opačná polarita *D72*, *D73*, na pozici *T61* použít typ PNP místo NPN a přepólování polarity přívodů měřených veličin k displejům). Vstup desky bude připojen k sekundárním vinutím výkonového transformátoru stejným způsobem jako u desky 2 v kladné verzi. Výstupní napětí pro smyčku zpětné vazby by pak bylo vhodnější vyhodnocovat váhově, aby střední hodnota napětí obou větví zdroje byla při nesymetrickém zatěžování konstantní. Pokud bychom chtěli použít nezávislou regulaci napětí a proudů v kladné a záporné větvi, bylo by nutné kromě vstupní sít'ové části na desce 1 a pomocných napájecích obvodů na desce 1 a 2 všechny ostatní obvody zdvojit a použít i 2 výkonové transformátory.

Vzhledem ke konstantní amplitudě pulzů může být i při jejich minimální šířce výstupní napětí zdroje bez zátěže značné, dosahující až maximální hodnoty. Proto byla zařazena předzátěž s *T61* v zapojení jednoduchého zdroje (zde spíše spotřebiče) proudu. Vzhledem ke značnému výkonu zdroje by ale pro zajištění poklesu výstupního napětí k nule musela být předzátěž podstatně větší a zhoršovala by účinnost zdroje.

Zdroj byl původně určen k napájení spotřebičů, konstruovaných k napájení z automobilového akumulátoru (12V/15Amax), jako je např. kompresor. U těchto zařízení případné malé překmity či zvlnění napětí nehrají významnou roli a zdroj tento požadovaný účel velmi dobře splní.

# Kapitola 11

## Závěr

Během řešení diplomové práce jsem se seznámila s vlastnostmi spínaných zdrojů a popsala jejich základní vlastnosti.

Získané poznatky jsem využila pro návrh zdroje zadaných parametrů. Ten je navržen jako snižující propustný měnič v zapojení polovičního můstku.

Navrhla jsem a pomocí programu PSpice a Micro-Cap odsimulovala návrh zdroje zadaných parametrů a pomocí literatury jsem navrhla požadovaný transformátor. V programu Eagle jsem navrhla desky plošných spojů.

V posledním semestru jsem návrh zrealizovala. Zdroj byl funkční, naměřené parametry odpovídaly zamýšlenému použití. Byly rovněž diskutovány možnosti modifikace na zdroj symetrický nebo na dvojité zdroj obou polarit s možností nezávislého nastavení obou výstupů. Výsledky měření na funkčním vzorku jsou uvedeny v kapitole 10.

## Kapitola 12

# Seznam zkratek a symbolů

$A_e$  [ $\text{mm}^2$ ] průřez jádra  
 $A_L$  [ $\text{nH/z}^2$ ] indukční konstanta  
 $B$  [ $\text{T}$ ] magnetická indukce  
**DPS** deska plošného spoje  
 $d_1, d_2$  [ $\text{mm}$ ] průměr vodiče  
**EMC** elektromagnetická kompatibilita  
**ESR** [ $\Omega$ ] ekvivalentní sériový odpor kondenzátoru  
 $H$  [ $\text{A/m}$ ] intenzita magnetického pole  
 $I_m$  [ $\text{A}$ ] magnetovací proud  
 $I_{mMAX}$  [ $\text{A}$ ] maximální magnetovací proud  
 $L$  [ $\text{H}$ ] indukčnost  
 $l_e$  [ $\text{m}$ ] délka magnetické siločáry  
 $n$  [-] transformační poměr  
**PFC** (Power Factor Correction) korekce účinníku (pulzního zatížení sítě)  
 $P_{ld}$  [ $\text{kW/m}^3$ ] hustota ztrátového výkonu v jádru  
 $P_v$  [ $\text{W}$ ] ztrátový výkon v jádru transformátoru  
**PWM** pulzně šířková modulace  
 $S_1, S_2$  [ $\text{mm}^2$ ] průřez vodiče na vinutí  
 $S_e$  [ $\text{mm}^2$ ] efektivní průřez jádra  
 $T$  [ $\text{s}$ ] perioda spínání  
 $U_1$  [ $\text{V}$ ] napětí na primární straně transformátoru  
 $U_2$  [ $\text{V}$ ] napětí na sekundární straně transformátoru  
 $V_e$  [ $\text{m}^3$ ] objem jádra  
 $\Delta\phi_c$  [ $\text{Wb}$ ] zdvih cívkového magnetického indukčního toku  
 $\delta$  [-] činitel plnění impulzu  
 $\mu_0$  [ $\text{H/m}$ ] permeabilita vakua ( $4\pi 10^{-7} \text{H/m}$ )  
 $\mu_r$  [-] relativní permeabilita materiálu  
 $\sigma$  [ $\text{A/m}^2$ ] proudová hustota  
 $\phi$  [ $\text{Wb}$ ] magnetický tok

# Literatura

- [1] 3f3 Material specification. MOTOROLA, Září 2008, [Online; navštíveno 7.8.2010].  
URL [http://www.elnamagnetics.com/wp-content/uploads/library/Ferroxcube-Materials/3F3\\_Material\\_Specification.pdf](http://www.elnamagnetics.com/wp-content/uploads/library/Ferroxcube-Materials/3F3_Material_Specification.pdf)
- [2] Babčaník, J.: Spínané zdroje. HW server s.r.o., Květen 2007, [Online; navštíveno 7.3.2009].  
URL <http://hw.cz/Teorie-a-praxe/ART1876-Spinane-zdroje.html>
- [3] Basso, C. P.: *Switch-mode power supplies, SPICE simulations and practical designs*. New York: Electronic engineering, 2008, ISBN 978-0-07-150858-2.
- [4] Components, P.: *UR cores and accessories - Product specification*. Philips Components, 2000.
- [5] Dostál, J.: *Operační zesilovače*. Praha: BEN - Technická literatura, 2005, ISBN 80-7300-049-0.
- [6] Ferrites and accessories - P 41 x 25. Epcos AG, 2006, [Online; navštíveno 7.11.2010].  
URL [http://www.epcos.com/inf/80/db/fer\\_07/p\\_41\\_25.pdf](http://www.epcos.com/inf/80/db/fer_07/p_41_25.pdf)
- [7] Faktor, Z.: *Transformátory a tlumivky pro spínané napájecí zdroje*. Praha: BEN - Technická literatura, 2002, ISBN 80-86056-91-0.
- [8] GM Electronic, spol. s r. o. [Online; navštíveno 7.10.2010].  
URL <http://www.gme.cz/cz/>
- [9] International Rectifier. International Rectifier, 2008, [Online; navštíveno 12.11.2010].  
URL <http://www.irf.com/indexnsw.html>
- [10] Jaroslav Žáček, K. K.: EMC v technické praxi IV. <http://www.edituj.cz>, <http://mpresent.cz>, Září 2009, [Online; navštíveno 7.3.2009].  
URL <http://www.odbornecasopisy.cz>
- [11] Josef, J.: *Spínačová technologie v záložních zdrojích*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, Diplomová práce. Vedoucí práce: prof. ing. Lubomír Brančík, CSc., 2010.
- [12] National semiconductor. National semiconductor corporation, 2009, [Online; navštíveno 3.2.2009].  
URL <http://www.national.com>
- [13] Picard, J.; kolektiv autorů: *Texas Instruments: Power Supply Design seminar 2010-2011*. USA, Dallas, Texas: Etheridge Printing, 2010.

- [14] Semic Trade, s.: Řídící a regulační obvody. Semir Trade, s.r.o, Září 2009, [Online; navštíveno 12.11.2010].  
URL [http://www.semic.info/aktiva/A11\\_08.pdf](http://www.semic.info/aktiva/A11_08.pdf)
- [15] SWITCHMODE TM Pulse Width Modulation Control Circuit. MOTOROLA, [Online; navštíveno 7.8.2010].  
URL <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/motorola/TL494.pdf>
- [16] Texas Instruments. Texas Instruments, 2008, [Online; navštíveno 12.11.2010].  
URL <http://www.ti.com/>
- [17] TOPSwitch. POVER INTEGRATIONS, Inc, 2008, [Online; navštíveno 3.2.2009].  
URL <http://www.powerint.com/en/products/topswitchsupreg/sup-family>
- [18] Vlček, J.: IGBT a IGCT - nové spínací prvky. Červenec 2007, [Online; navštíveno 10.4.2009].  
URL <http://www.tzb-info.cz/download>.
- [19] Vlček, J.: Měníče napětí a spínané zdroje - teoretická základna. Červenec 2007, [Online; navštíveno 10.4.2009].  
URL <http://www.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=4263&h=292&pl=42>
- [20] Weisz, O.: Napáječe, stabilizátory, usměrňovače, násobiče. SOUEaEaU Vejprnická, 2002, [Online; navštíveno 10.4.2009].  
URL [http://www.edunet.souepl.cz/~weisz/dilna/ens2/t8/t2\\_8\\_6\\_0.php](http://www.edunet.souepl.cz/~weisz/dilna/ens2/t8/t2_8_6_0.php)



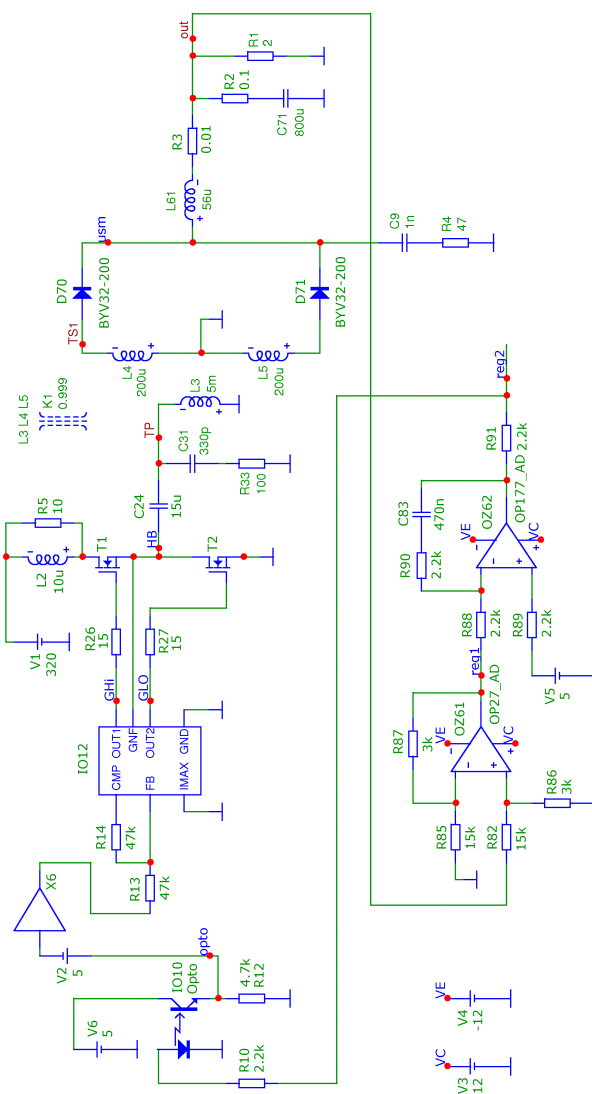
# Přílohy

## Seznam příloh

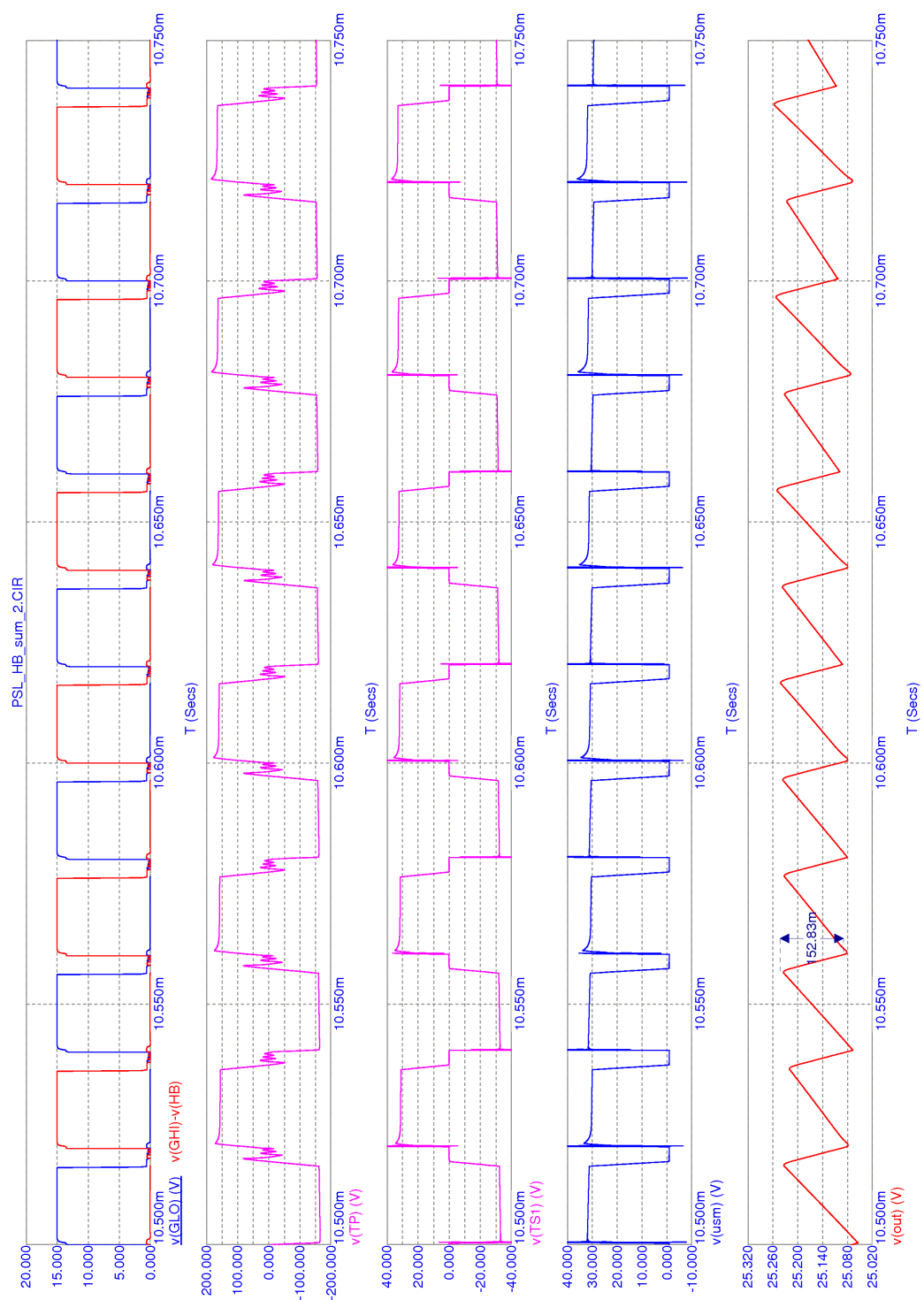
A Simulace	53
B Schéma zapojení	56
C Desky plošných spojů	62
D Osazení DPS	66
E Návrh skříně	68
F Rozpisky součástek	71

# Příloha A

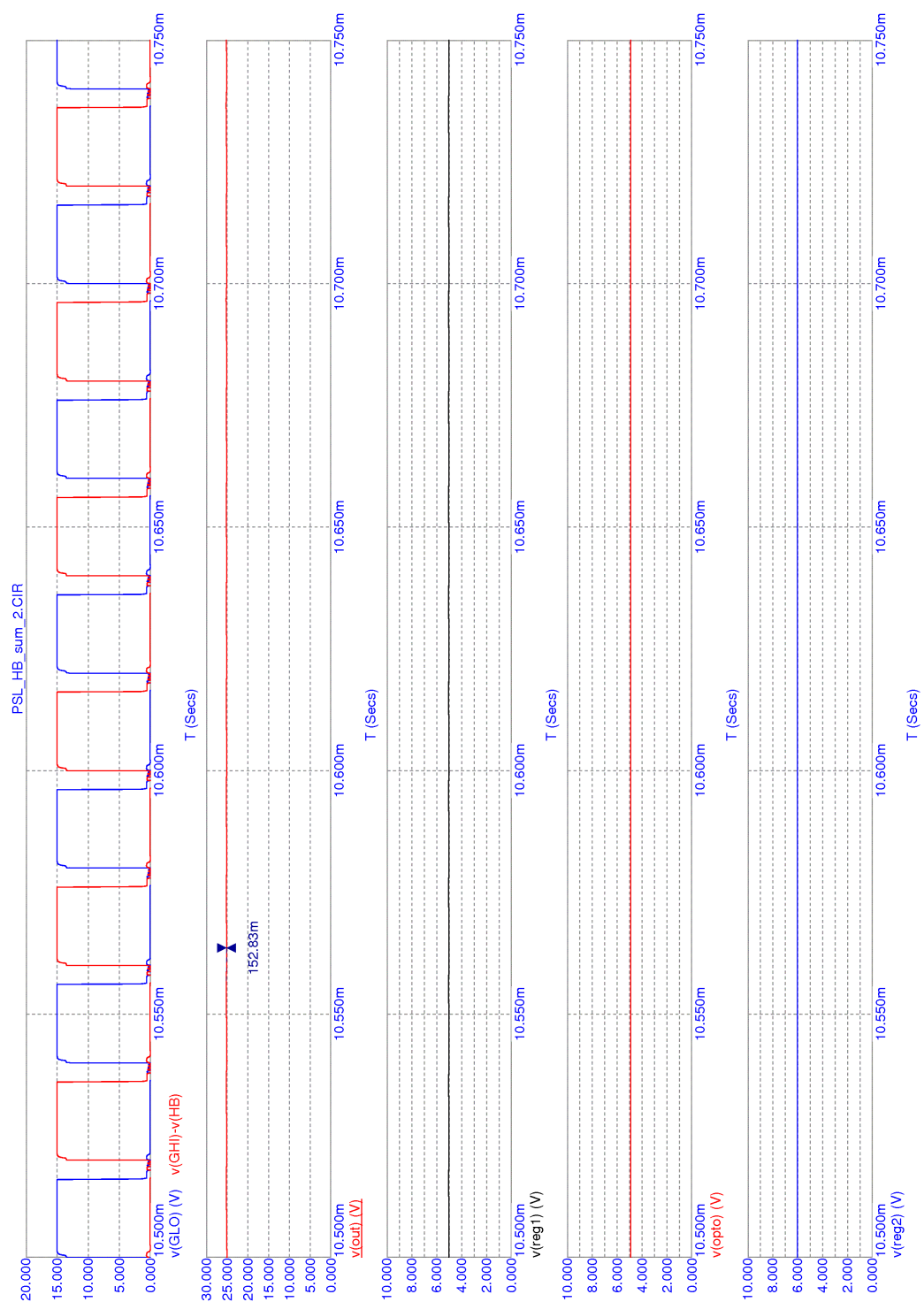
## Simulace



Obrázek A.1: Schéma simulovaného zjednodušeného obvodu



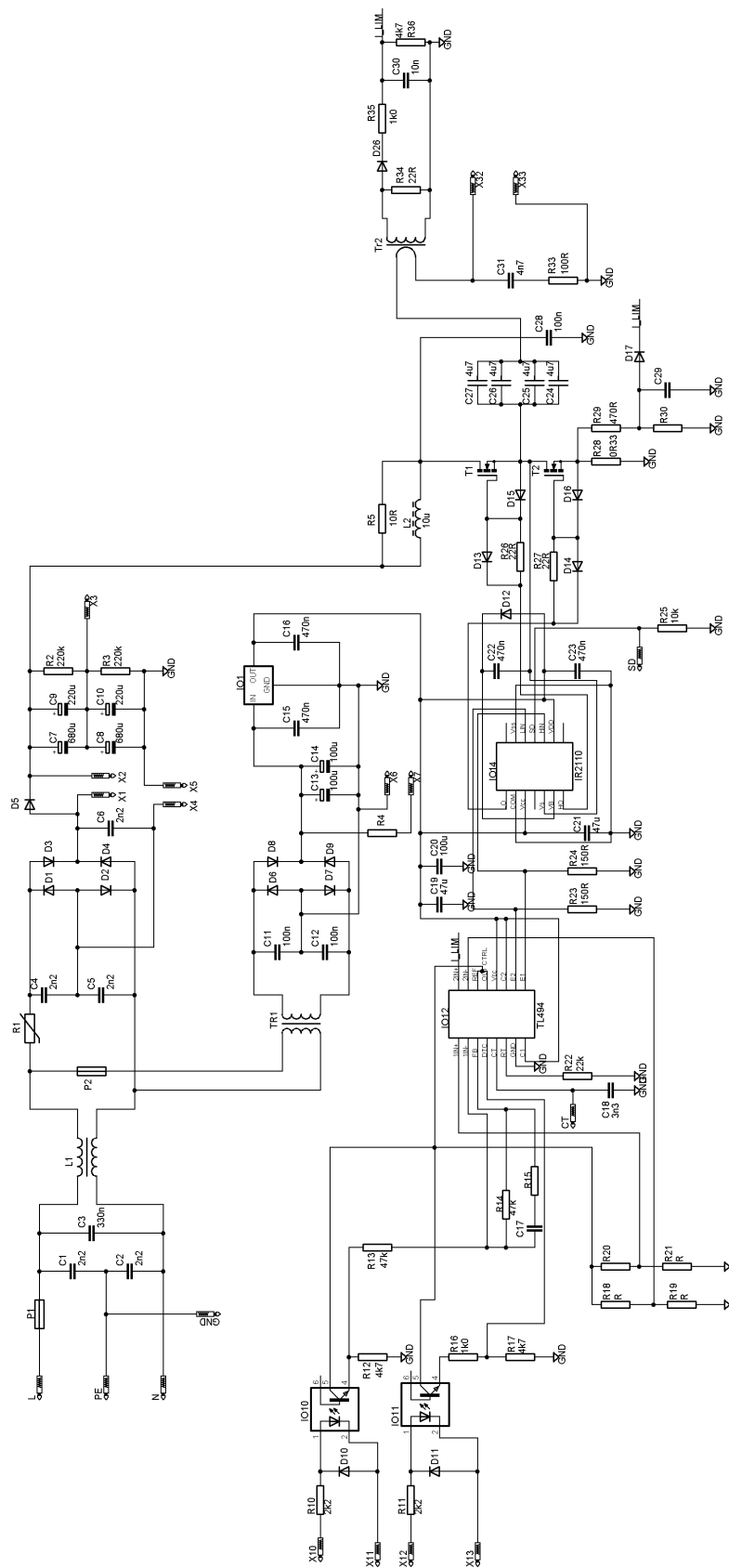
Obrázek A.2: Výsledky simulace 1. část - pulzní obvody



Obrázek A.3: Výsledky simulace 2. část - obvody regulační smyčky

## Příloha B

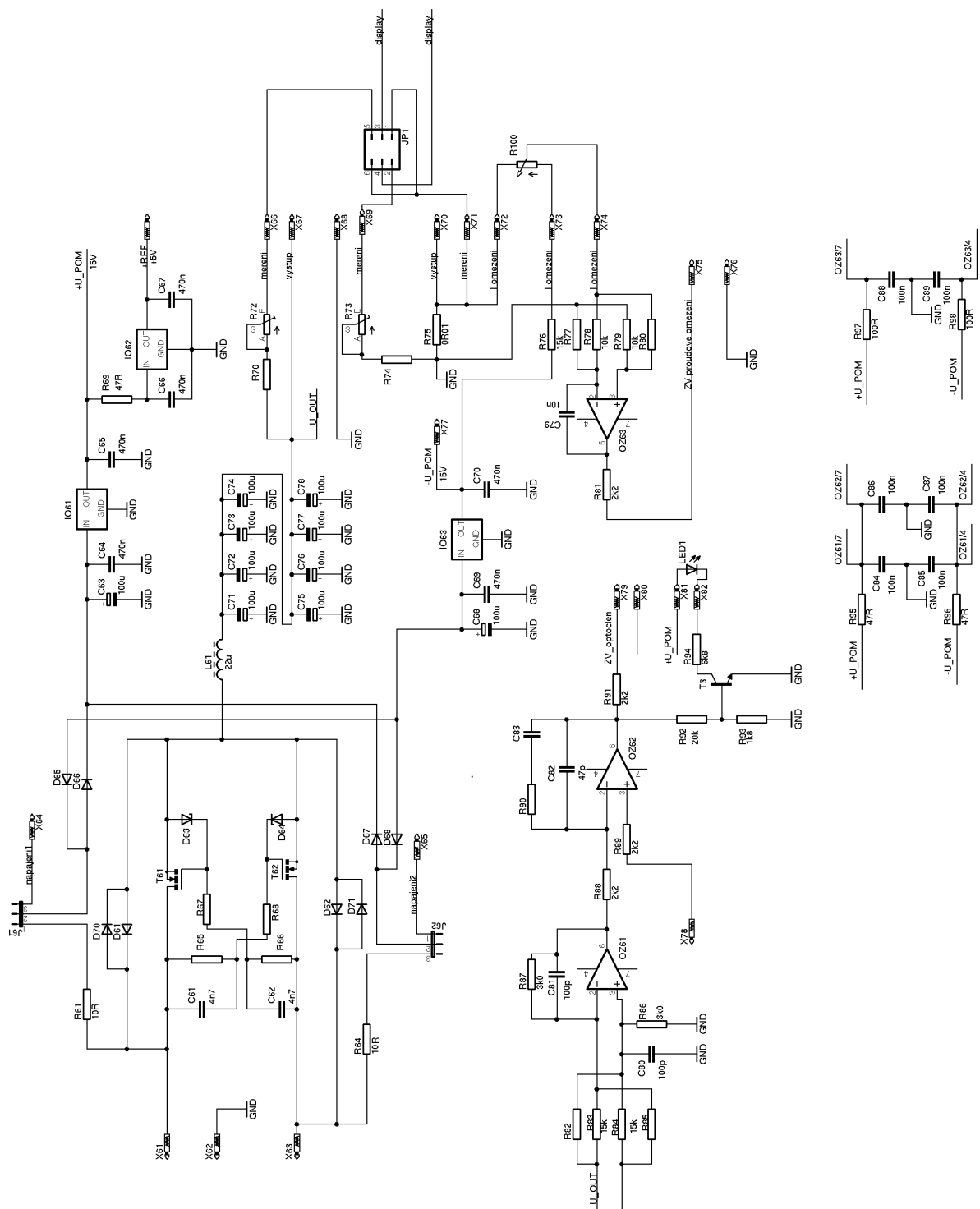
### Schéma zapojení



Obrázek B.1: Původní návrh zapojení síťové části a pulzního měniče

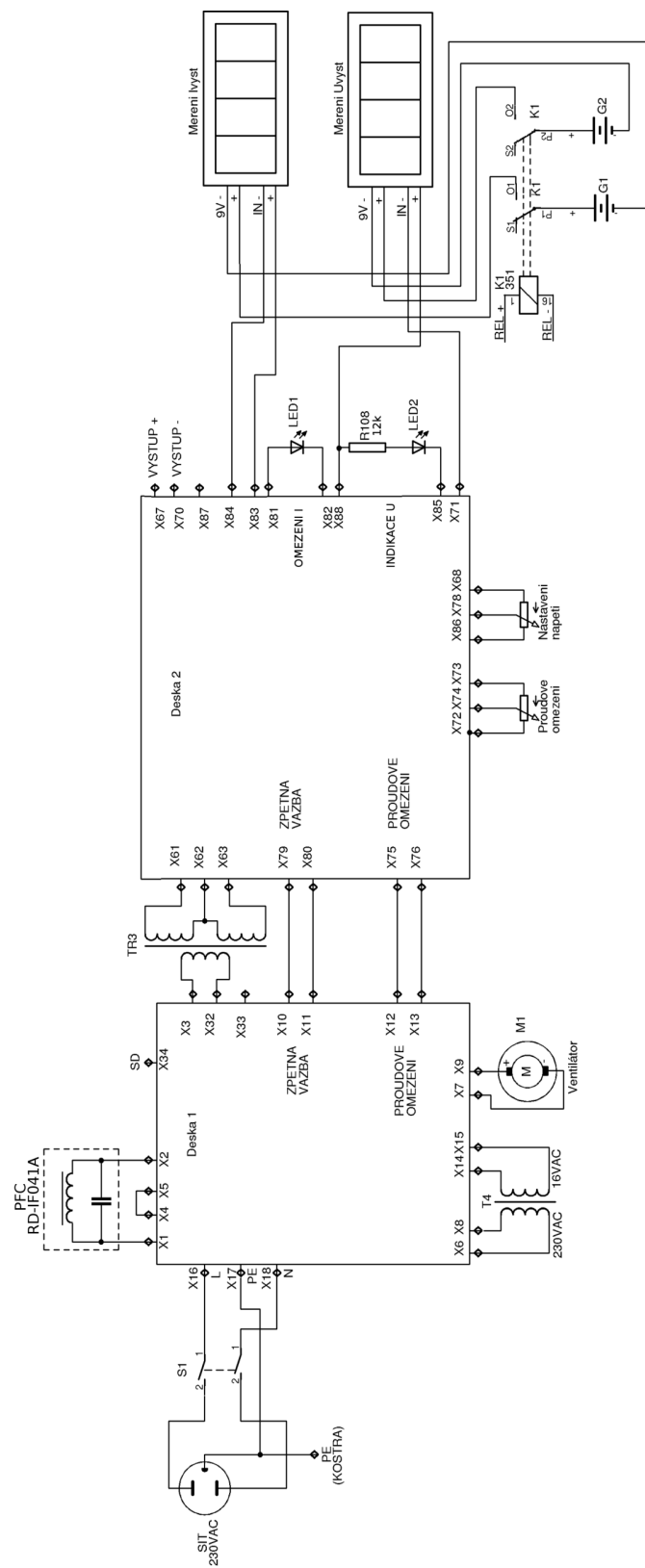






Obrázek B.3: Původní návrh zapojení výstupního usměrňovače a regulačních obvodů

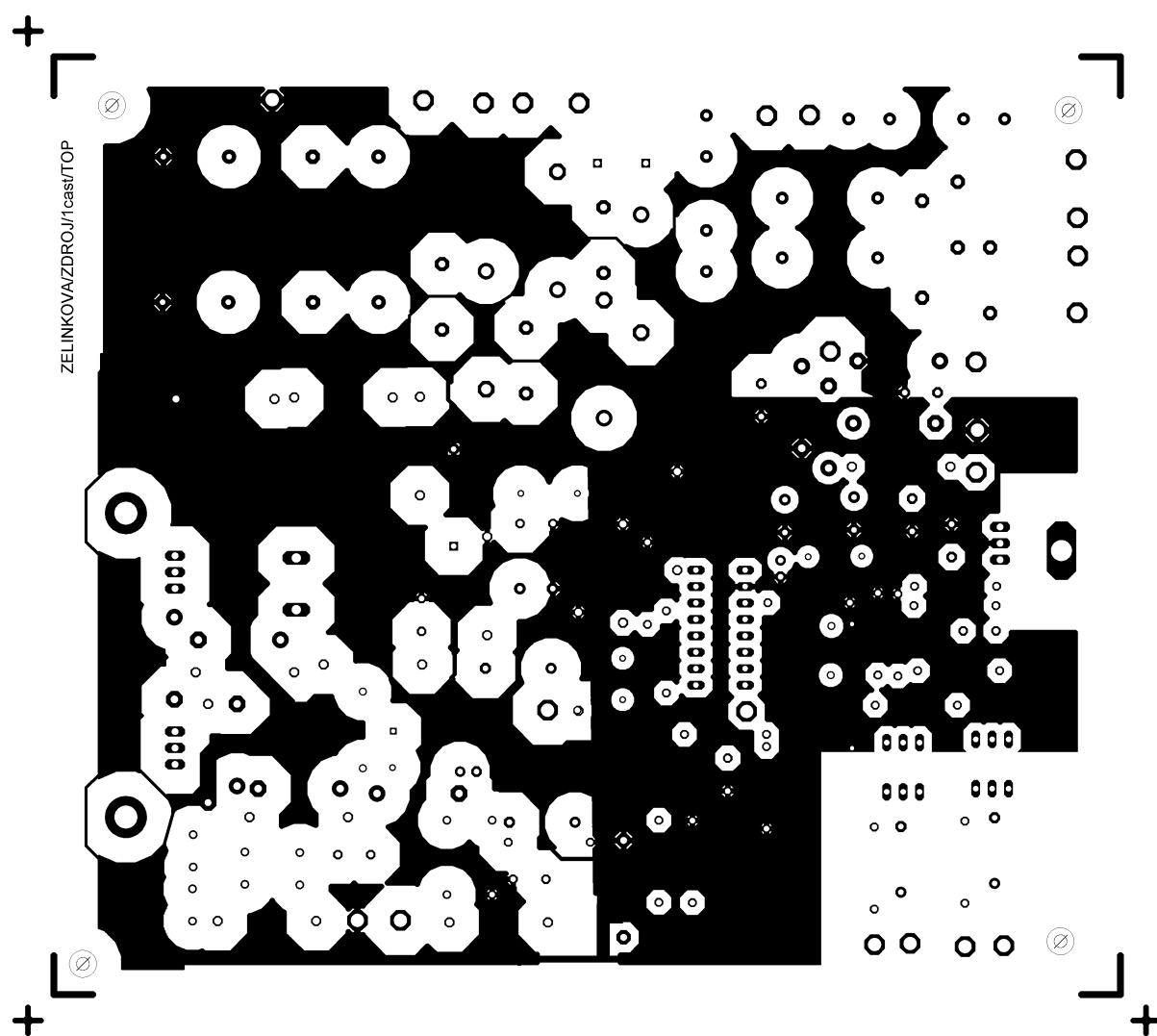




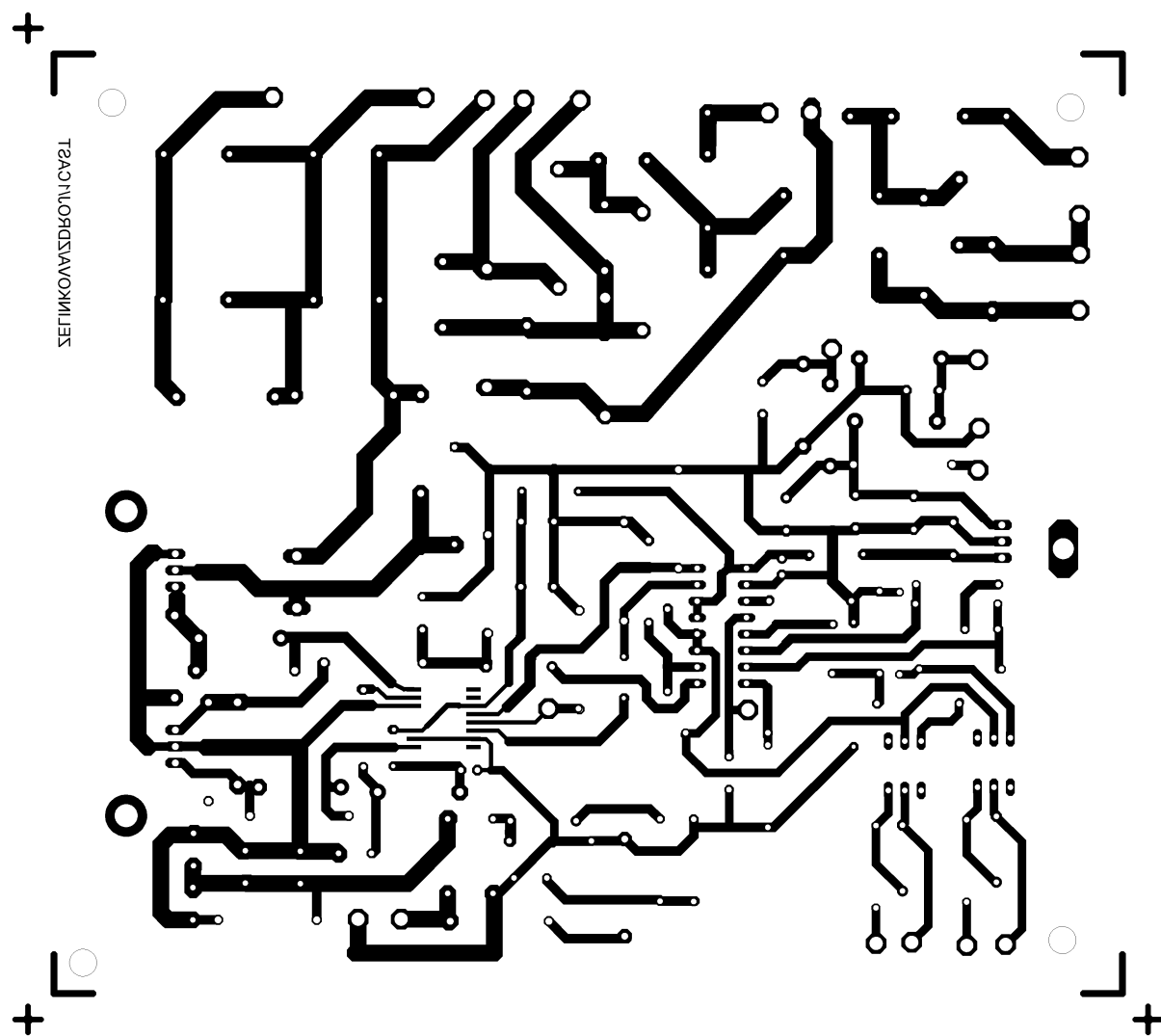
Obrázek B.5: Výkres propojení desek

## Příloha C

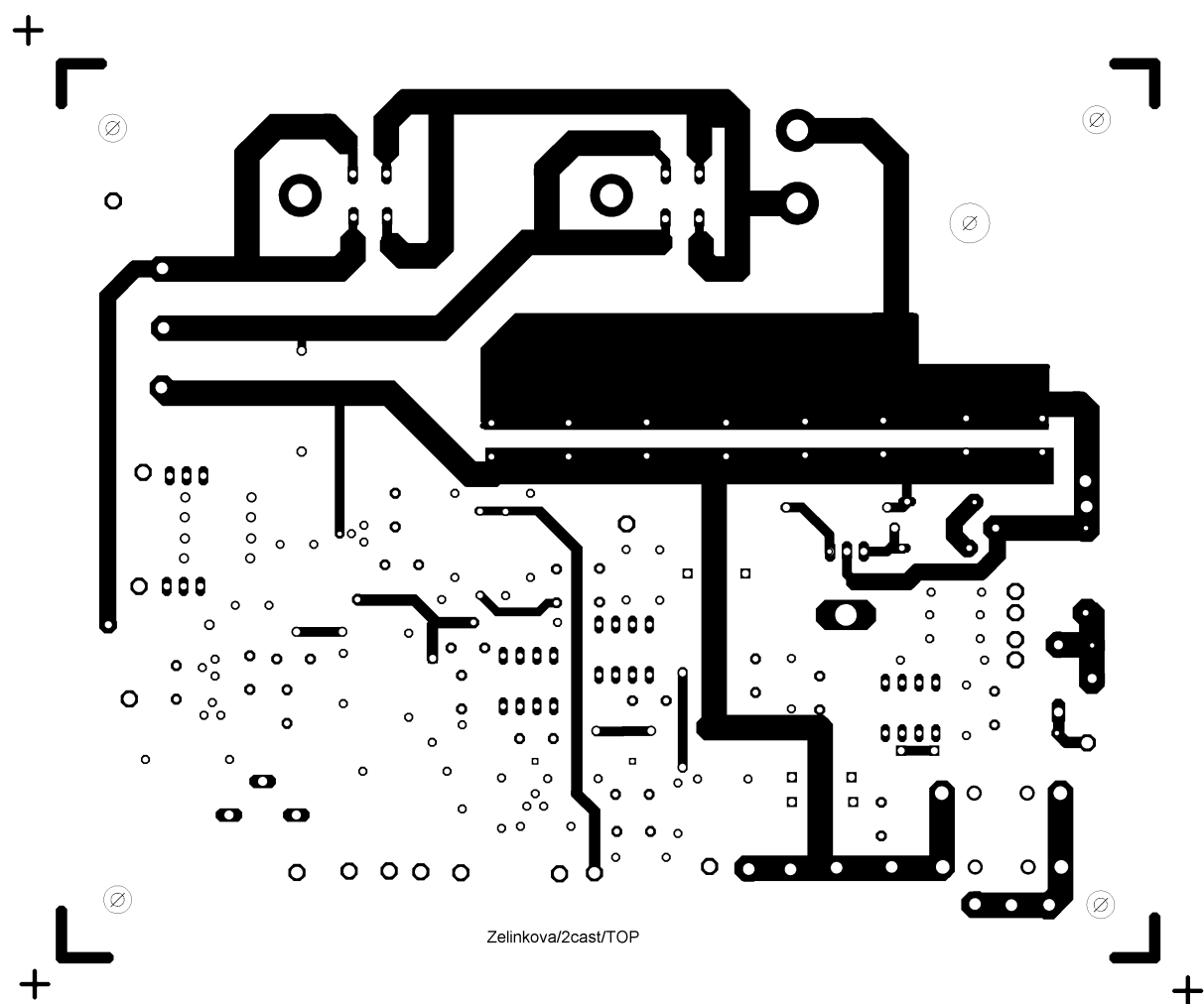
### Desky plošných spojů



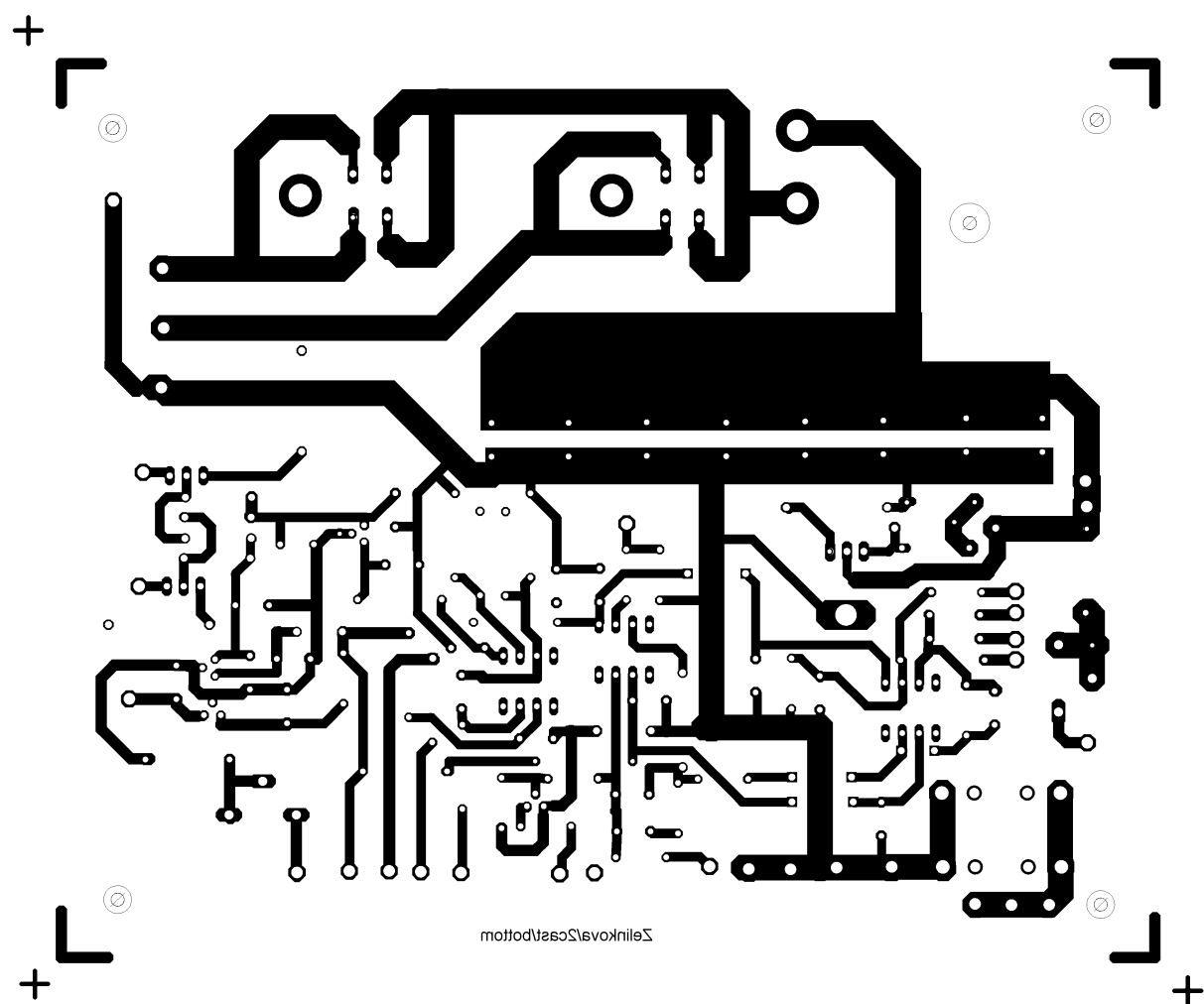
Obrázek C.1: DPS síťové části a pulzního měniče, strana TOP



Obrázek C.2: DPS síťové části a pulzního měniče, strana BOTTOM



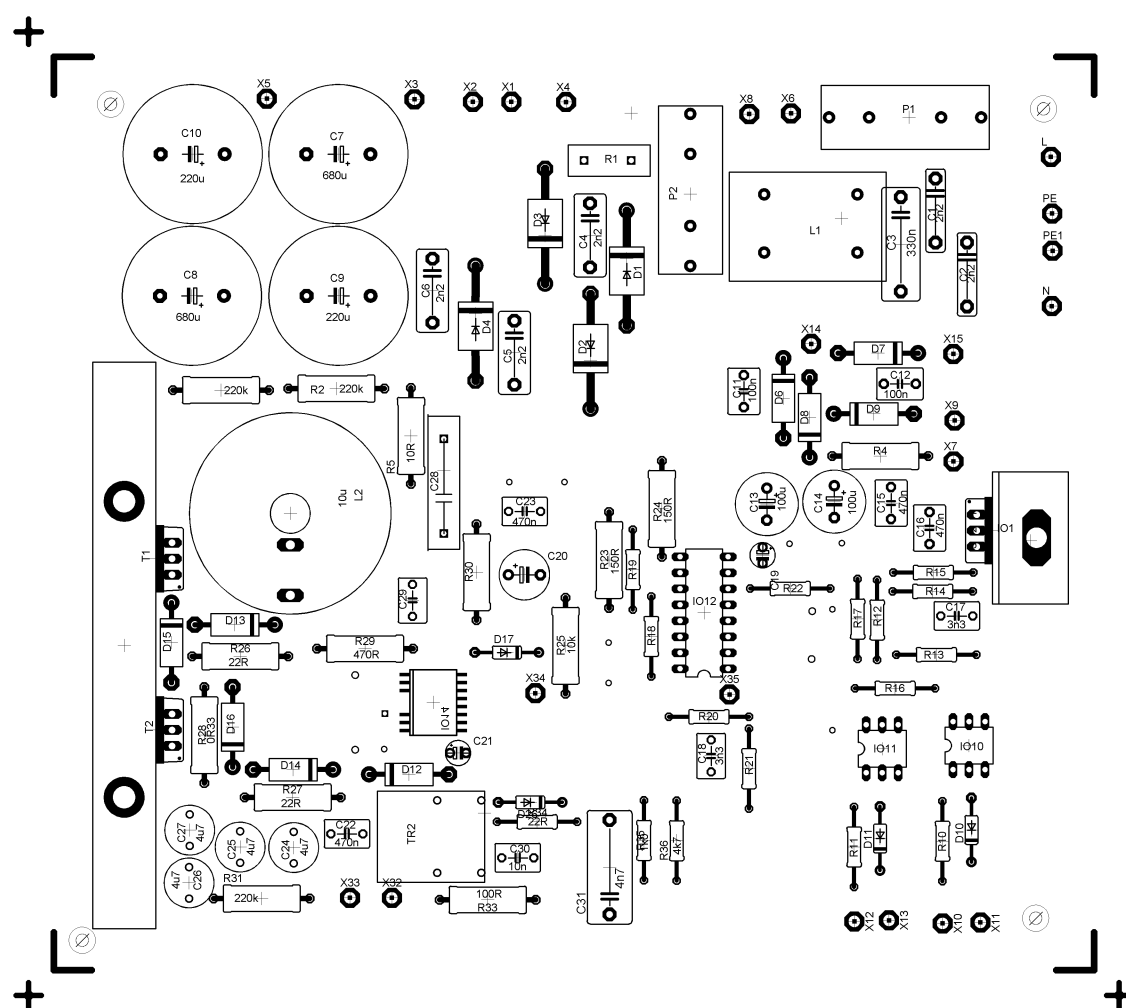
Obrázek C.3: DPS výstupního usměrňovače a regulačních obvodů, strana TOP



Obrázek C.4: DPS výstupního usměrňovače a regulačních obvodů, strana BOTTOM

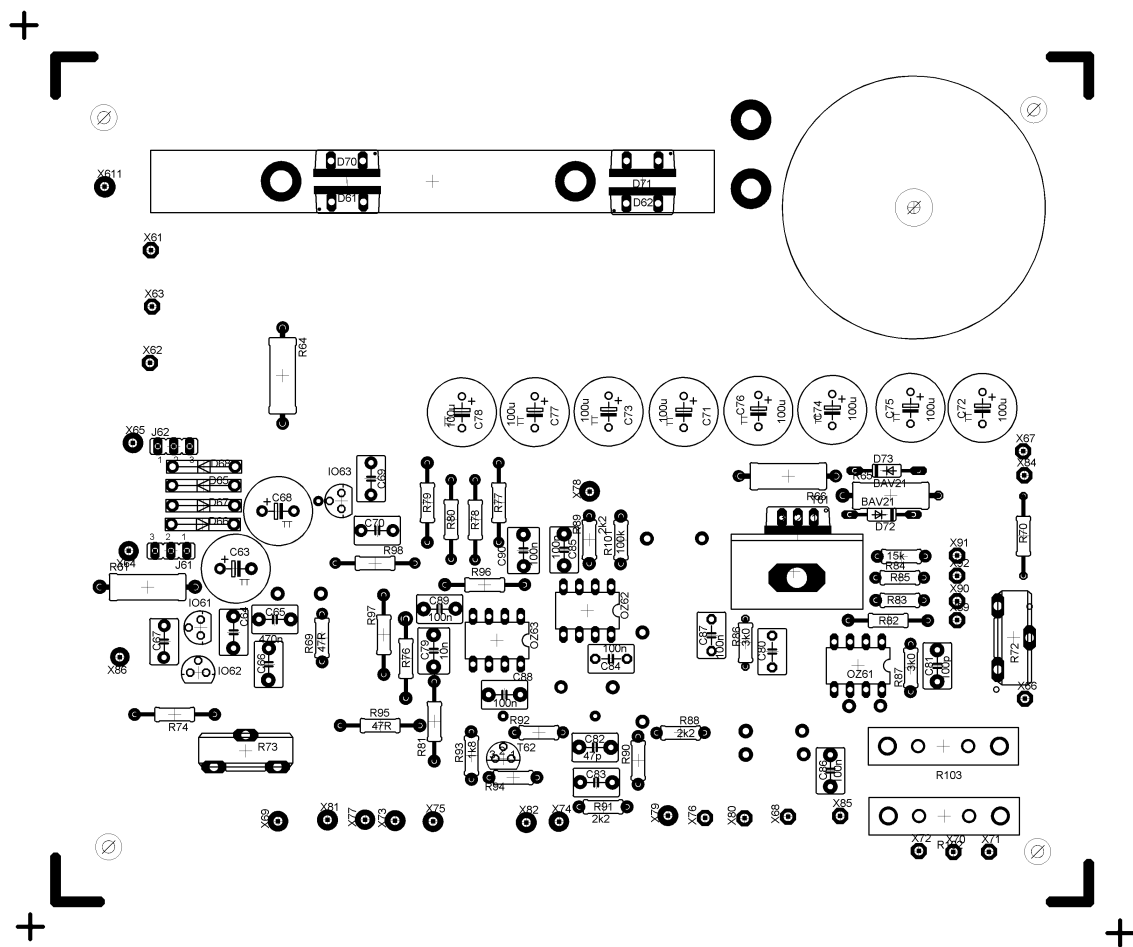
## Příloha D

# Osazení DPS



Obrázek D.1: Osazovací výkres síťové části a pulzního měniče

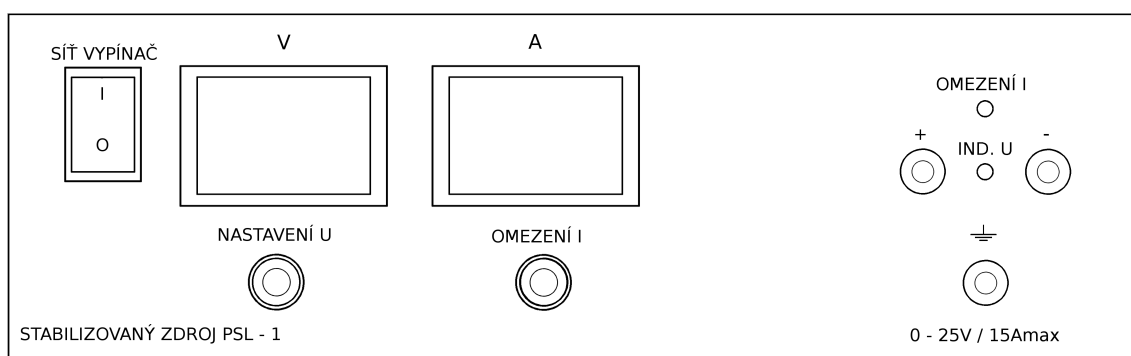




Obrázek D.2: Osazovací výkres výstupního usměrňovače a regulačních obvodů

## Příloha E

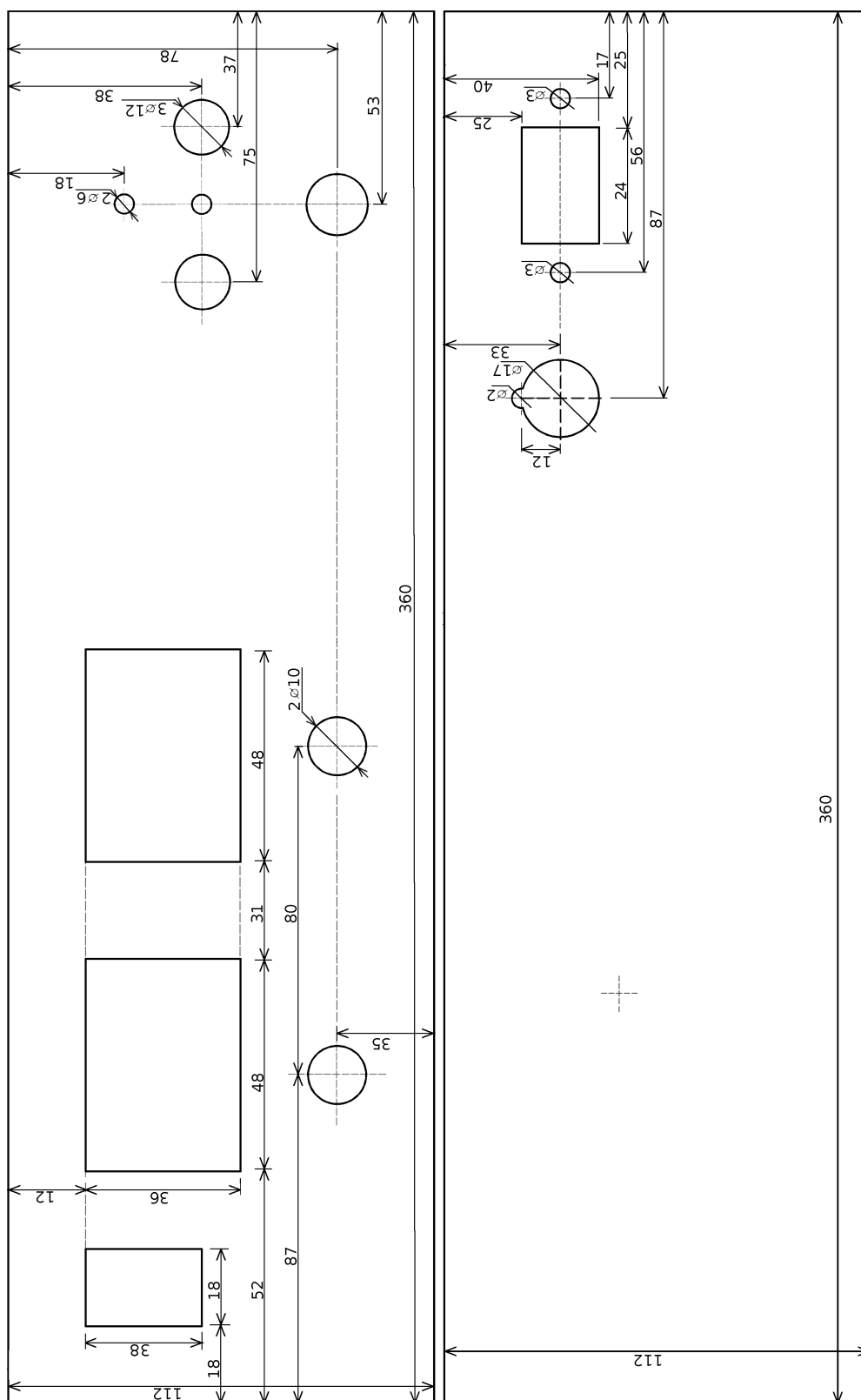
### Návrh skříně



Obrázek E.1: Návrh rozmístění ovládacích a indikačních prvků na předním panelu zdroje

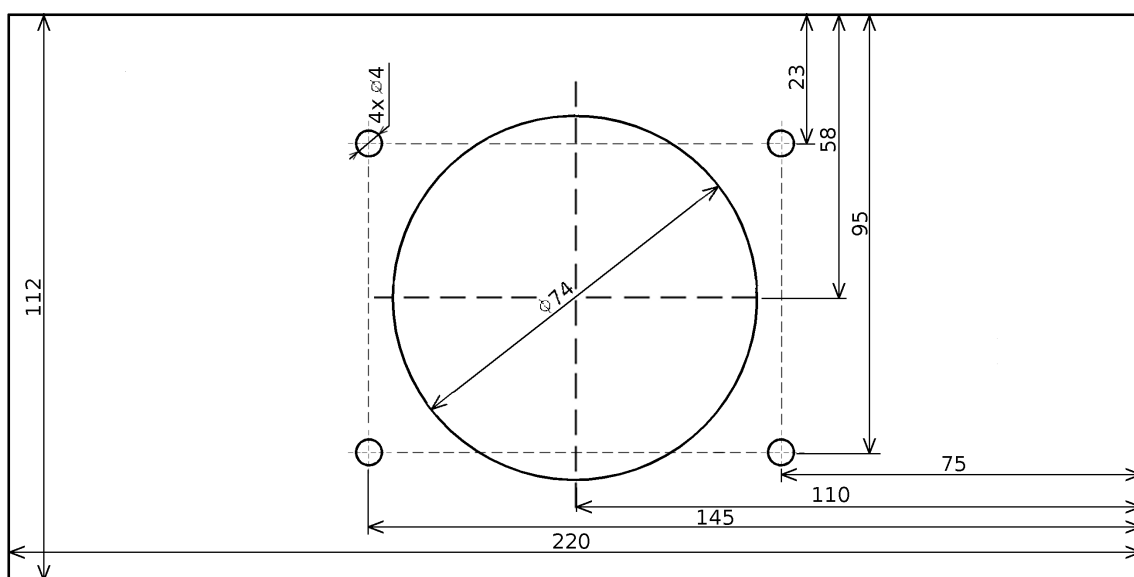


Obrázek E.2: Návrh rozmístění prvků napájení na zadním panelu zdroje



Obrázek E.3: Výkres pro vrtání otvorů v čele skříně zdroje

Obrázek E.4: Výkres pro vrtání otvorů v zadní části skříně zdroje



Obrázek E.5: Výkres pro vrtání otvorů v bočních stěnách skříně zdroje

## Příloha F

# Rozpisky součástek

Tabulka F.1: Rozpiska součástek, deska 1

Quantity	Reference	Value	Package	Note
5	C1,C2,C4,C5,C6	2n2, 250VAC/Y1, 20%	radial.	keram.
1	C3	330n, 275VAC/X2, 10%	radial.	foliový
2	C7, C10	680u, 200V	radial.	elektrolyt.
2	C8,C9	560u, 200V	radial.	elektrolyt.
2	C11,C12	100n, 63V, 5%	radial.	foliový
2	C13,C14	470u, 35V	radial.	elektrolyt.
4	C15,C16,C22,C23	470n, 63V, 5%	radial.	foliový
1	C17	1n0, 50V, 5%	radial.	keram.
1	C18	1n8, 100V, 5%	radial.	foliový
1	C19	100u, 35V	radial.	elektrolyt.
1	C20	150u, 25V	radial.	elektrolyt.
1	C21	47u, 35V	radial.	elektrolyt.
3	C25,C26,C27	4u7,450V	radial.	elektrolyt.
1	C28	100n,250VAC,10%	radial.	keram.
1	C29	100n,50V,10%	radial.	keram.
1	C30	10n,50V,10%	radial.	keram.
1	C31	330p,1000V,10%	axial.	foliový
4	D1,D2,D3,D4	1N5408	DO15	
4	D6,D7,D8,D9	1N4004	DO41	
2	D10,D11	BAV21	DO35	
1	D12	BYV26	SOD57	
2	D13,D14	1N5818	DO201AD	
2	D15,D16	BZV85	DO41	
2	D17,D26	BAT85	DO35	
1	IO1	LM7815	TO220	
2	IO10,IO11	4N35	DIL06	
1	IO12	TL494	DIL16	
1	IO14	IR2110S	SOIC16W	
1	L2	10uH	radial.	
1	P1	T4A	20x5mm	
pokračování na další straně				

Tabulka F.1 – pokračování

Quantity	Reference	Value	Package	Note
1	P2	T0.2A	20x5mm	
1	R1	NTC50-11	radial.	termistor
3	R2,R3,R31	220K,0.5W,10%	TR152	vrstvový
1	R5		10R, 1W,5%	vrstvový
3	R6,R21,R22	15K,0.6W,1%	0207/12	vrstvový
4	R10,R11,R15,R19	2K2,0.6W,1%	0207/12	vrstvový
3	R12,R17,R36	4K7,0.6W,1%	0207/12	vrstvový
2	R13,R14	47K,0.6W,1%	0207/12	vrstvový
2	R16,R35	1K0,0.6W,1%	0207/12	vrstvový
1	R18	20K,0.6W,1%	0207/12	vrstvový
1	R20	18K,0.6W,1%	0207/12	vrstvový
2	R23,R24	150R,0.5W,5%	MLT-0.5	vrstvový
1	R25	10K,0.6W,1%	0207/12	vrstvový
2	R26,R27	15R,0.5W,5%	TR192	vrstvový
1	R28	0R47,1W,5%		vrstvový
1	R29	470R,0.6W,1%	0207/12	vrstvový
1	R33	100R,1W,5%	TR153	vrstvový
1	R34	22R,0.6W,1%	0207/12	vrstvový
2	T1,T2	IRF820	TO220AB	
1	TR2	CT		proud. transf.

Tabulka F.2: Rozpiska součástek, deska 2

Quantity	Reference	Value	Package	Note
10	C63, C68, C71, C72, C73, C74, C75, C76, C77, C78	100u, 50V	radial.	elektrolyt.
3	C64, C66, C69	470n, 63V, 5%	radial.	foliový
1	C65	470n, 63V, 10%	radial.	foliový
2	C67, C70	470n, 63V, 20%	radial.	foliový
8	C79, C84, C85, C86, C87, C88, C89, C90	100n, 50V, 10%	radial.	keramický
2	C80, C81	100p, 50V, 10%	radial.	keramický
1	C82	47p, 50V, 5%	radial.	keramický
1	C83	470n, 50V, 10%	radial.	keramický
4	D61, D62, D70, D71	PBYR1645	TO220	
4	D65, D66, D67, D68	BYT52G	SOD57	
2	D72, D73	BAV21	DO35	
1	IO62	78L05	TO92	
1	IO61	78L12	TO92	
1	IO63	79L12	TO92	
2	J61, J62	JUMPER3		
1	L61	56u		
3	OZ61, OZ62, OZ63	OP177G	IO08	
2	R61, R64	10R, TR192, 0.5W, 5%	axial.	vrstvový
1	R65	1K0, 1W, 5%	axial.	vrstvový
1	R66	10R, 0.6W, 1%	axial.	vrstvový
3	R69, R95, R96	47R, 0.6W, 1%	axial.	vrstvový
3	R76, R82, R85	15K, 0.6W, 1%	axial.	vrstvový
2	R77, R80	10K, 0.6W, 1%	axial.	vrstvový
5	R81, R88, R89, R90, R91	2K2, 0.6W, 1%	axial.	vrstvový
2	R86, R87	3K0, 0.6W, 1%	axial.	vrstvový
1	R92	20K, 0.6W, 1%	axial.	vrstvový
1	R93	1K8, 0.6W, 1%	axial.	vrstvový
1	R94	6K8, 0.6W, 1%	axial.	vrstvový
6	R97, R98, R104, R105, R106, R107	100R, 0.6W, 1%	axial.	vrstvový
1	R101	100K, 0.6W, 1%	axial.	vrstvový
2	R102, R103	0R02, PBV, 3/10W, 0.5%	axial.	vrstvový
1	T61	BD911	TO220	
1	T62	BC547	TO92	

Tabulka F.3: Rozpiska součástek, skříní

Quantity	Reference	Value	Package	Note
1	G1, G2	9V		baterie destičková
2	LCD1, LCD2		HD-3438	LCD Display
1	LED1		D=5mm	červená
1	LED2		D=5mm	zelená
1	P1	4A/250VAC	REMOS	poj. pouzdro
1	PFC		RD-IF041A	PFC tlumivka
2	R100, R101	1K0/N	TP 280 n20A, Tesla	potenciometr
1	R108	12K, 0.6W, 1%	axial.	vrstevový
1	S1		C1553AB, ARCOLECT- RIC	sít'. vypínač
1	T4		TS6/10, UNITRA	transformátor
1	TR3			pulz. transf.
1	V1		ASF82271001, MATSUSHITA	ventilátor
1	X1	6A/250VAC	KFS 4300.5054, SCHURTER	sít'. přívod
3	X67, X70, X85			Zdírka